



**Maisterintutkielma**  
**Hydrogeologia ja ympäristögeologia**

Pintavesi-pohjavesi vuorovaikutus ja ihmisen toiminnan näkyminen Hyrylän  
pohjavesialueella

Tuuli Hankaankorpi

2021

Ohjaajat:  
Kirsti Korkka-Niemi, Anna-Liisa Kivimäki ja Kari Korhonen

Geologian ja geofysiikan maisteriohjelma  
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta



HELSINGIN YLIOPISTO  
HELSINGFORS UNIVERSITET  
UNIVERSITY OF HELSINKI

MATEMAATTIS-LUONNONTIEDELLINEN TIEDEKUNTA  
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN  
FACULTY OF SCIENCE

Tiedekunta – Fakultet – Faculty		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme	
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Geologian ja geofysiikan maisteriohjelma	
Opintosuunta – Studieinriktning – Study track Hydrogeologia ja ympäristögeologia			
Tekijä – Författare – Author			
Tuuli Hankaankorpi			
Työn nimi – Arbetets titel – Title			
Pintavesi-pohjavesi vuorovaikutus ja ihmisen toiminnan näkyminen Hyrylän pohjavesialueella			
Työn laji – Arbetets art – Level	Aika – Datum – Month and year	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages	
Maisterintutkielma	Toukokuu 2021	86	
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>Tutkimuskohteena on Hyrylän pohjavesialue, joka sijaitsee Etelä-Suomessa, Tuusulan kaupunkikeskuksessa. Hyrylän pohjavesialue on 1-luokan pohjavesialue, joka on luokiteltu myös kemialliseksi riskikohteeksi. Pohjavesialueella sijaitsee Keski-Uudenmaan Vesi Kuntayhtymän Koskenmäen vedenottamo, josta pumpataan pohjavettä talouskäyttöön päivittäin keskimäärin 1000 m<sup>3</sup>. Pohjavesialue on muodostunut luode-kaakkosuuntaiseen harjuun, joka on osa Hyvinkäältä I-Salpausselältä lähtevää harjujaksoa. Lounais-koillissuuntainen kallion murroslaakso sijoittuu pohjavesialueen keskelle, jonka mukaisesti myös Tuusulanjärvi ja -joki ovat muodostuneet.</p> <p>Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää pintaveden ja pohjaveden välistä vuorovaikutusta Hyrylän pohjavesialueella ja saada parempi kuva alueen geologiasta sekä pohjaveden liikkeistä. Tuusulanjoella ja pohjavesiäkviferin välillä on aikaisemmissa tutkimuksissa huomattu hydraulisia yhteyksiä. Pohjaveden kulkeutumisreittiä Koskenmäen vedenottamolle oli tärkeä selvittää, sillä tutkimusalueella vanhan polttoaineen jakeluaseman alueella maaperä ja pohjavesi ovat pilaantuneet öljyhiilivedyillä. Murroslaakson vaikutuksia pohjaveden liikkeisiin ja vedenottamon antoisuuteen selvitettiin myös tutkimuksen osana.</p> <p>Pintavesi-pohjavesi vuorovaikutusta tutkittiin termisin menetelmin ja suotovirtaamamittauksin. Hyrylän pohjavesialueen pohjaveden havaintoputkista, Tuusulanjokeen purkautuvasta pohjavedestä ja Tuusulanjoen vedestä kerättiin näytteitä, joista analysoitiin stabiilit isotoopit, pääionit ja hivenaineet. Pohjavesialueesta tehtiin 3D-rakennemalli, jonka lähtötietoina käytettiin painovoimamittauksia ja alueella tehtyjen painokairausten maaperätietoja. Pohjavesinäytteenoton yhteydessä mitattiin havaintoputkista myös pohjaveden pinnankorkeudet. 3D-rakennemallin perusteella tehtiin Hyrylän pohjavesialueesta pohjaveden virtausmalli selvittämään pohjaveden liikkeitä. Pohjavesialueen geologiaa yritettiin selvittää maatulokaluotaimen avulla, mutta mittaukset olivat epäonnistuneet, eikä maatulokaluotauksen tuloksia voitu käyttää apuna 3D-rakennemallin laatimisessa.</p> <p>Tulokset osoittavat pohjaveden purkautuvan Tuusulanjokeen Koskenmäen vedenottamon läheisyydessä. Vesinäytteenoton perusteella voitiin havaita pintavesiyhteys vain yhdessä näytteenottopaikassa. 3D-mallinnuksen tuloksena saatiin selkeä kuva alueen kallionpinnasta sekä havainnollistavia poikkileikkauksia maaperän rakenteesta. Pohjaveden virtausmalli osoitti pohjaveden virtaavan Koskenmäen vedenottamolle kaakosta. Pohjavesi virtaa murroslaaksoon enimmäkseen idästä ja kaakosta. Pohjavesialueen luoteisosasta pohjavesi virtaa koillisen kautta murroslaakson pohjoisosiin. Pilaantuneet alueet eivät ole Koskenmäen vedenottamon kaivon sieppausalueella. Tuusulanjoen länsiosiin purkautuvan pohjaveden voitiin tunnistaa vesianalyysien perusteella tulevan eri lähteestä kuin joen itäpuolelle purkautuva pohjavesi. Murroslaaksoissa pohjavesi virtaa kohti etelää ja purkautuu Koskenmäen vedenottamon lounaispuolella Tuusulanjokeen.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Hyrylä, pintavesi, pohjavesi, vuorovaikutus, vedenottamo, rakennemalli, virtausmalli, vesianalyysit			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Helda			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			
34 kuvaa, 12 taulukkoa, 1 liitesivu			



HELSINGIN YLIOPISTO  
HELSINGFORS UNIVERSITET  
UNIVERSITY OF HELSINKI

MATEMAATTIS-LUONNONTIEELLINEN TIEDEKUNTA  
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN  
FACULTY OF SCIENCE

Tiedekunta – Fakultet – Faculty		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme	
Faculty of Science		Master's programme of geology and geophysics	
Opintosuunta – Studierikning – Study track Hydrogeology and environmental geology			
Tekijä – Författare – Author			
Tuuli Hankaankorpi			
Työn nimi – Arbetets titel – Title			
Groundwater-surface water interactions and human impact in Hyrylä groundwater area			
Työn laji – Arbetets art – Level	Aika – Datum – Month and year	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages	
MSc thesis	May 2021	86	
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>The study area is Hyrylä groundwater area, located in southern Finland, in the city center of Tuusula. Hyrylä groundwater area is class 1 groundwater area, and it is classified as a chemical risk area. The Koskenmäki water pumping plant, owned by Keski-Uudenmaan Vesi Kuntayhtymä, is in the groundwater area, where on average 1000 m<sup>3</sup> of water is pumped daily for domestic use. The groundwater area is situated in a southwest to northeast orientated esker which is a part of a bigger esker series starting from I-Salpausselkä in Hyvinkää. There is a big southwest to northeast orientated shear zone in the bedrock under the groundwater area where Lake Tuusulanjärvi and Tuusula-river follow the shear zone.</p> <p>The aim of this study was to research the interactions between river water and groundwater in the Hyrylä groundwater area and to get a better understanding of the geology of the area. Additionally, the movements of the groundwater were studied. Based on earlier studies the groundwater is discharging to the Tuusula-river near the Koskenmäki water pumping plant and the river water has been recharging to the groundwater. There are contaminated areas surrounding the old gas station in Hyrylä, where the soil and groundwater are contaminated with oil hydrocarbons, hence it was important to study where the water to Koskenmäki water pumping plant is coming from. Effects of the shear zone to the movements of the groundwater and to the amount of water available for pumping were also examined.</p> <p>The groundwater-river water interactions were studied with thermal methods and seepage meters. Isotopic and chemical tracers were analyzed from the water samples, which were collected from the groundwater observation wells, groundwater discharging to Tuusula-river and from the river water itself. A 3D geological structure model of the groundwater area was made based on earlier gravimetric measurements and drillhole data. The water table measurements from the observation wells were taken at the same time when the water samples were collected. Based on the 3D structure model a groundwater flow model was made to explain the movements of groundwater in Hyrylä. The geology of the groundwater area was examined with ground-penetrating radar, but the measurements were not successful and did not give any useful data for making the 3D model.</p> <p>The results of this study show that the groundwater is discharging to the Tuusula-river near the Koskenmäki water pumping plant. Based on the water analyses done, there was only one water sample with surface water mixed in it. 3D modeling gave a clear picture of the bedrock surface and cross-sections of the soil structure. According to the groundwater flow model, groundwater is flowing to the Koskenmäki water pumping plant from southeast. To the shear zone groundwater flows mostly from east and southeast. From the northwest part of the groundwater area the groundwater is flowing via northeast to the northern parts of the shear zone. The contaminated areas are not in the flow path to Koskenmäki water pumping plant. Based on the water analyses, groundwater discharging to the western parts of Tuusula-river is from a different source than the water discharging to the eastern parts of the river. In the shear zone the groundwater flow direction is to the south and the groundwater discharges to the river southwest of the Koskenmäki water pumping plant.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Hyrylä, surface water, groundwater, water pumping plant, structure model, flow model, water analyses			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Helda			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			
34 figures, 12 tables, 1 appendix			

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	5
1.1. Pintavesi-pohjavesi vuorovaikutus.....	6
2. AIKAISEMMAT TUTKIMUKSET .....	8
3. POHJAVESIALUEEN GEOLOGIA .....	10
4. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO .....	16
4.1. Tausta-aineisto .....	17
4.2. Maatutkaluotaus .....	19
4.2.1. Luotausprofiilien käsittely Reflexw -ohjelmalla .....	24
4.3. Termiset menetelmät.....	25
4.3.1 Käsikäyttöinen lämpökamera .....	25
4.3.2. Tuusulanjoen pohjasedimentin lämpötilamittaus .....	26
4.4. Suotovirtaamamittaus.....	27
4.5. Minipietsometri .....	29
4.6. Pohjavesinäytteenotto ja pinnakorkeusmittaukset .....	31
4.7. Vesianalyysit .....	34
4.8. 3D -hydrostratigrafisen rakennemallin luominen .....	37
4.9. Pohjaveden virtausmallin luominen ModelMuse -ohjelmalla .....	40
4.9.1. Mallin laatiminen.....	41
4.9.2. Mallin kalibrointi ja ennustejot.....	43
5. TULOKSET .....	45
5.1. Maatutkaluotaus .....	45
5.2. Termiset menetelmät.....	47
5.2.1. Käsikäyttöinen lämpötilakamera .....	47
5.2.2. Sedimenttilämpötilamittari .....	49
5.3. Suotovirtaamamittaukset.....	50

5.4. Pohjavesinäytteenotto ja pinnankorkeusmittaukset .....	51
5.4.1. Kenttämittaukset ja havainnot .....	51
5.4.2. Laboratorioanalyysit.....	53
5.5. 3D-hydrostratigrafinen rakennemalli .....	56
5.6. Pohjaveden virtausmalli .....	59
6. TULOSTEN TARKASTELU.....	63
6.1. Pohjaveden laatu .....	63
6.1.1. Pääionikoostumus.....	63
6.1.2. Hivenaineet.....	66
6.2. Pohjavesialueen rakenne ja pohjaveden virtauskuva .....	67
6.2.1. Maatutkaluotaus pohjavesialueen geologisen rakenteen selvittämisessä.....	67
6.2.2. 3D-mallin poikkileikkaukset .....	68
6.2.3. Murroslaakson vaikutus pohjaveden liikkeisiin .....	71
6.3. Pintaveden ja pohjaveden vuorovaikutus Hyrylän pohjavesialueella.....	76
7. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	79
8. KIITOKSET.....	81
9. VIITELUETTELO.....	82
10. LIITTEET .....	85

## 1. JOHDANTO

Taajama-alueella sijaitseva Hyrylän pohjavesialue on jatkuvasti alttiina ihmisen toiminnan vaikutuksille alati muuttuvassa ja kehittyvässä kaupunkiympäristössä. Hyrylän pohjavesialueen keskiössä Koskenmäellä sijaitsee Keski-Uudenmaan Vesi Kuntayhtymän vedenottamo. Koskenmäen vedenottamolla pumpataan pohjavettä päivittäin talouskäyttöön. Keski-Uudenmaan Vesi Kuntayhtymä tarkkailee vuosittain pohjaveden laatua yhdessä muiden alueella toimivien yritysten kanssa (Betoni Center Oy, Hio-Mex Oy, Parma Oy, Teollisuusmaalaamo VTM Oy) Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys ry:n yhteistarkkailusuunnitelman mukaan (Lindgren ja Kivimäki 2019). Koskenmäellä on toiminnassa yksi vedenottoaivo, josta on lupa ottaa vettä vuosikeskiarvona enintään  $2700 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  (LSVEO 8/1999/1). Pohjavesitietojärjestelmän (POVET) mukaan Hyrylän A pohjavesialue on luokiteltu määrällisesti hyväksi, mutta kemiallisesti riskialueeksi. Koskenmäen vedenottamolla on Länsi-Suomen vesioikeuden vahvistama vedenottamon suoja-alue (L-Sveo no 12/1990/1, 15.3.1990).

Aikaisemmissa tutkimuksissa on huomattu Hyrylän pohjavesialueella olevan hydraulisia yhteyksiä pintavesien ja pohjavesiakviferin välillä (Brander 2013, Kivimäki et al. 2013, Rautio 2015). Pohjavesialueen läpi virtaa Tuusulanjoki, joka saa alkunsa pohjavesimuodostuman pohjoispuolella sijaitsevasta Tuusulanjärvestä. Koskenmäen vedenottamo sijaitsee Tuusulanjoen pohjoispuolella noin 20 metriä rannasta. Pohjavesien laatua tarkastellessa tulee ottaa huomioon mahdolliset vuorovaikutukset pintavesien kanssa, jotta tuloksia voidaan tulkita oikein. Pintavesien ja pohjavesien vuorovaikutuksesta tiedetään vielä vähän ja niiden ymmärtäminen sekä alueellinen tunteminen on tärkeää pohjaveden laadun tarkkailun kannalta. Tässä tutkielmassa selvitetään pintaveden ja pohjaveden sekoittumissuhteita eri osissa tutkimusaluetta sekä pintavesi-pohjavesi vuorovaikutuksen vaikutusta Koskenmäen vedenottamolta pumpattavan veden laatuun.

Hyrylän pohjavesialueella sijaitsee suuri koillis-lounassuuntainen murroslaakso, jonka päälle on muodostunut luode-kaakkosuuntainen harju (Breilin et al. 2005). Pohjavesialue on sijoittunut harjuun, mutta murroslaakso ja kallion suuret syvyysvaihtelut tekevät pohjaveden liikkeiden ennakoimisesta monimutkaista. Tässä tutkielmassa tehdään

pohjavesialueesta 3D-hydrostratigrafinen rakennemalli sekä pohjaveden virtausmalli auttamaan Hyrylän pohjavesialueen geologisen rakenteen ja pohjaveden virtauksen ymmärtämisessä. Hyrylän taajamassa on aikaisemmin tapahtunut maaperän pilaantumista, jonka seurauksena myös pohjaveteen on kulkeutunut polttoaineyhdisteitä (Kivimäki ja Luodeslampi 2019). Pilaantumisen seurauksena on alueella suoritettu suojapumppauksia ja jälkiseurantaa (Golder Associates Oy 2019). Pilaantumisen kannalta on tärkeää selvittää, mistä pohjavesi Koskenmäen vedenottamolle tulee. Pohjaveden virtausmallin avulla selvitetään, kuinka laajalta alueelta ottamolle kulkeutuu vettä ja vaikuttaako kallion murroslaakso ottamon antoisuuteen.

### **1.1. Pintavesi-pohjavesi vuorovaikutus**

Vuorovaikutus pintavesien ja pohjaveden välillä on tärkeä osa molempia systeemejä, vaikutti se sitten molempiin suuntiin tai vain toiseen (Winter et al. 1998). Pääasiassa veden liikettä systeemistä toiseen ohjaavat maanpinnan korkeusvaihtelut, pohjaveden pinnan taso ja fysikaaliset olosuhteet vuorovaikutusalueilla (Conant et al. 2019). Pintavesisysteemejä on monenlaisia, joissa jokaisessa vuorovaikutus pintaveden ja pohjaveden välillä voi olla hyvin erilainen. Hyrylän pohjavesialueella keskiössä on Tuusulanjoki, joten tässä tutkimuksessa keskitytään pääasiassa jokiveden ja pohjaveden väliseen vuorovaikutukseen.

Pohjavettä purkautuu jokeen, kun joen ympäröivän pohjaveden pinnan taso ja vertikaalihydraulinen korkeus ovat korkeammalla kuin joen vedenpinnan taso (Woessner 2020). Vertikaalihydraulinen korkeus on se korkeus, johon pohjavesi voi nousta vertikaalisesti esimerkiksi kaivossa (Rosenberry ja LaBaugh 2008). Pohjaveden purkautumista jokeen voi edistää esimerkiksi pohjaveden pinnan nousu ja joen vedenpinnan lasku (Winter et al. 1998). Pintaveteen purkautuvan pohjaveden määrään vaikuttavat hydraulisen gradientin suuruus ja alueella vallitsevan maaperän vedenjohtavuus (Woessner 2020). Samat tekijät vaikuttavat myös pintavedestä pohjaveteen imeytyvän veden määrään. Joesta taas pintavettä imeytyy pohjaveteen, kun pohjaveden pinnan taso ja vertikaalihydraulinen korkeus ovat matalammalla kuin joen pinnan taso (Woessner 2020). Imeytymistä joesta pohjaveteen voi tapahtua esimerkiksi joen tulvakausina tai kun pohjaveden pinta on laskenut normaalia alemmas. Pohjaveden

pinta laskee kuivien ajanjaksojen myötä, jolloin pohjavettä ei muodostu yhtä paljon kuin normaalisti tai jos alueen pohjaveden pumpppaamalla pumpataan pohjavettä enemmän kuin sitä ehtii muodostua (Winter et al. 1998). Pintavedestä pohjaveteen imeytyvä vesi muodostaa vedellä kyllästyneen vyöhykkeen maaperän alle ja saattaa tällöin paikallisesti nostaa pohjaveden pinnantasoja (Woessner 2020).

Myös geologiset olosuhteet, esimerkiksi maaperän huokoisuus, vaikuttavat pintavesien ja pohjaveden väliseen vuorovaikutukseen (Woessner 2020). Jos pintavesialtaan pohjasedimentti on vettä läpäisemätöntä, ei vuorovaikutusta pääse tapahtumaan. Harjualueilla maaperä on monin paikoin hyvin vettä johtavaa, joten Hyrylässä olosuhteet pohjaveden virtaukselle ja pintavesi-pohjavesi vuorovaikutukselle ovat hyvät. Jos aiemmin on ajateltu pohjaveden ja pintaveden olevan omia systeemejään ilman minkäänlaista vuorovaikutusta, voi pohjaveden purkautuminen jokeen muuttaa paljonkin käsitystä alueen pohjaveden liikkeistä. Myös pintaveden imeytyminen pohjavesiakoviferiin voi selittää laatuvahteluita normaalisti hyvälaatuisessa pohjavesiakoviferista pumpatussa talousvedessä.

Tässä tutkimuksessa selvitetään pintavesi-pohjavesi vuorovaikutusta Hyrylän pohjavesialueella. Tutkimusalueelta kerätään pohjavesi- ja pintavesinäytteitä, joista selvitetään pintaveden ja pohjaveden sekoittumissuhdetta. Tutkimuksessa selvitetään pohjaveden kulkeutumista Koskenmäen vedenottamolle sekä murroslaakson vaikutuksia pohjaveden liikkeisiin. Tutkimuksen avuksi tehdään Hyrylän pohjavesialueesta 3D-hydrostratigrafinen rakennemalli ja pohjaveden virtausmalli. Tutkimuksen tarkoituksena on saada kattava kuva Hyrylän pohjavesialueen rakenteesta ja pohjaveden liikkeistä Hyrylän pohjavesialueella.



## 2. AIKAISEMMAT TUTKIMUKSET

Hyrylässä tehdyissä tutkimuksissa on paikallisten tutkimusten ohella selvitetty erilaisten tutkimusmenetelmien soveltuvuutta ja toimivuutta erilaisissa vesiympäristöissä (Brander 2013, Kivimäki et al. 2013, Rautio 2015). Hyrylän pohjavesialueen pintavesi-pohjavesi vuorovaikutusta on tutkittu Vantaanjoen ja sen sivujokien tutkimusten yhteydessä ja siellä on huomattu pintavesi-pohjavesi vuorovaikutusta molempiin suuntiin (Brander 2013, Kivimäki et al. 2013, Rautio 2015).

Geologian tutkimuskeskus (GTK) on suorittanut Hyrylässä pohjavesialueen geologisen rakenne selvityksen vuonna 2005. Breilin et al. (2005) tutkimus kattaa Mätäkiennummen ja Vaunukankaan välisen alueen, johon kuuluu myös Hyrylän pohjavesialue. Tutkimus sisältää selvityksen Tuusulan alueen pohjaveden pinnan tasosta ja virtaussuunnista, maaperäkerrostumien rakenteesta sekä kallionpinnan korkokuvasta, jotka ovat tehty pohjaveden pintatietoihin, painovoimamittauksiin ja kairauksiin perustuen.

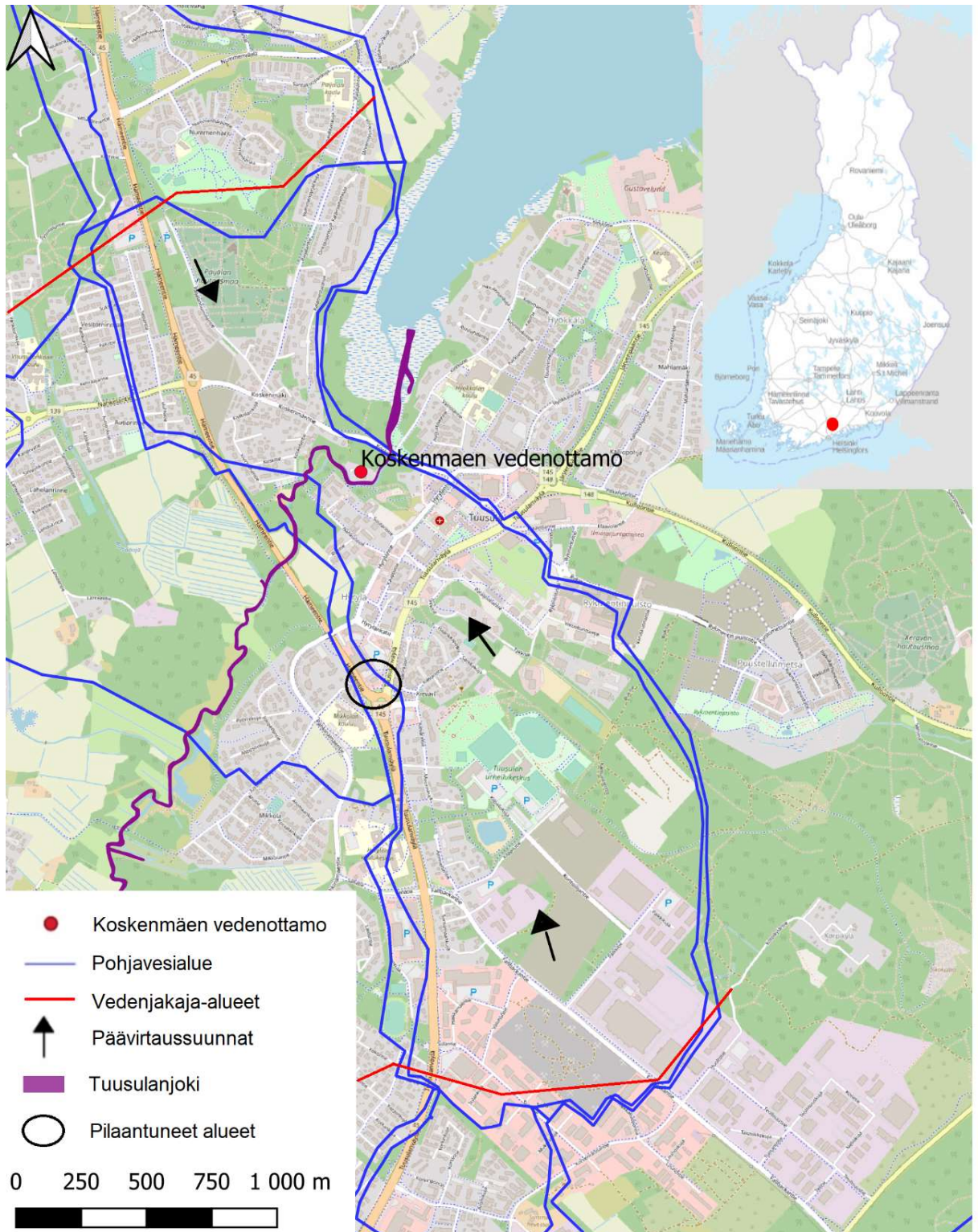
Tarkempaa tutkimusta Hyrylän alueen pintavesi-pohjavesi vuorovaikutuksesta on tehty Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys ry:n (VHVSY) Vapomix-hankkeen yhteydessä, jossa Kivimäki et al. (2013) tavoitteena oli selvittää pohjavesimuodostumien ja jokivesien hydraulisia yhteyksiä Vantaanjoen pääuomassa ja sen sivuhaaroilla mukaan lukien Tuusulanjoella. Tutkimuksessa huomattiin, että Hyrylän pohjaveden laatuun ja koostumukseen vaikuttavat ainakin alueen läpi virtaava Tuusulanjoki sekä jokiveden kautta myös Tuusulanjärvi, josta joki saa alkunsa. Myös Tuusulan pohjavesiyhteistarkkailun vuosiraportissa (Lindgren ja Kivimäki 2019) on päätelty Koskenmäen vedenottamolta pumpatun veden ajoittaisen heterotrofisen pesäkeluvun kohoamisen johtuvan pintaveden imeytymisestä Tuusulanjoesta pohjaveteen. Vapomix-hankkeen osana pintavesi-pohjavesi vuorovaikutusta Hyrylän alueella tutkivat väitöskirjassaan Rautio (2015) ja opinnäytetyössään Brander (2013). Brander (2013) huomasi tutkimuksessaan virtaaman Tuusulanjoessa vaihtelevan merkittävästi tutkimuspisteissä eri aikoina, mikä voi tarkoittaa, että samassa paikassa olosuhteiden mukaan pohjavettä purkautuu jokeen ja pintavettä imeytyy joesta akviferiin vaihtelevasti. Raution (2015) tutkimus osoitti, että vuorovaikutus pohjaveden ja pintavesien välillä on paljon yleisempää kuin aiemmin on ajateltu, joten saman alueen pinta- ja pohjavesiä tulisi tutkia tarkemmin yhdessä, eikä erikseen kahtena eri systeiminä.

Pöyry Finland Oy on tehnyt vuonna 2018 Hyrylän pohjavesialueella raportin vedenoton ja kaupunkikaavoituksen yhteensovittamisesta (Keskitalo 2018). Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten pohjaveden antoisuus voidaan turvata tulevaisuudessa, kun rakentaminen Hyrylän pohjavesialueella jatkuu ja kuinka hulevesiä tulee käsitellä, etteivät ne vaikuta vedenottoon Koskenmäen pohjavedenottamolla. Raportista selviää, että pohjaveden muodostuminen Hyrylän pohjavesialueella on jo heikentynyt huomattavasti rakentamisen seurauksena. Valuma-alueella sijaitsee mm. Sulan teollisuusalue, vanhoja maa-ainesottoalueita ja vanha Hyrylän varuskunnan ampumarata, jotka yhdessä tiiviin rakentamisen kanssa heikentävät pohjaveden laatua ja ovat merkittävä ympäristöriski (Keskitalo 2018). Pöyry on myös aikaisemmin tutkinut vedenottamoiden pintavesivaikutuksia isotooppimäärityksen avulla Hyrylässä (Pöyry Finland Oy 2015). Tutkimuksen mukaan pintavesiosuus Koskenmäen kaivossa olisi näytteenottoajankohtina syyskuussa ja lokakuussa ollut 7 – 8 %.

Tuusulan ja Rusutjärven suojelusuunnitelman (Kivimäki ja Luodeslampi 2019) mukaan vanhat polttoaineenjakuasemat ovat aiheuttaneet maaperän pilaantumista Hyrylän pohjavesialueella ja Hyrylässä sijaitsee myös pohjavedelle haitallisia aineita käsitteleviä pienyrityksiä. Haitallisia aineita ovat ne aineet, jotka heikentävät pohjaveden käyttöä talousvetenä (Kivimäki ja Luodeslampi 2019). Merkittävin pilaantunut alue sijaitsee entisellä Oy Teboil Ab:n polttoaineiden jakeluasemakiinteistöillä, jossa maaperän lisäksi myös kalliopohjavesi on todettu pilaantuneeksi polttoainehiilivedyillä (Kivimäki ja Luodeslampi 2019). Pilaantunut alue sijaitsee kalliokohouman päällä, alle kilometrin päässä Koskenmäen vedenottamolta, jossa pohjaveden päävirtaussuunta on luoteeseen eli vedenottamon suuntaan. Tuusulan ja Rusutjärven suojelusuunnitelmassa (Kivimäki ja Luodeslampi 2019) on tehty arvio MTBE:n (Metyyli-tert-butyylieetteri) levinneisyysalueesta Oy Teboil Ab:n jakeluasemakiinteistön ja Koskenmäen vedenottamon välisellä alueella vuonna 2018. Arvion mukaan suurimmat pilaantumiset sijaitsevat huoltoaseman läheisyydessä ja pilaantuminen on hyvin vähäistä pohjoiseen, Koskenmäen suuntaan, mentäessä.

### 3. POHJAVESIALUEEN GEOLOGIA

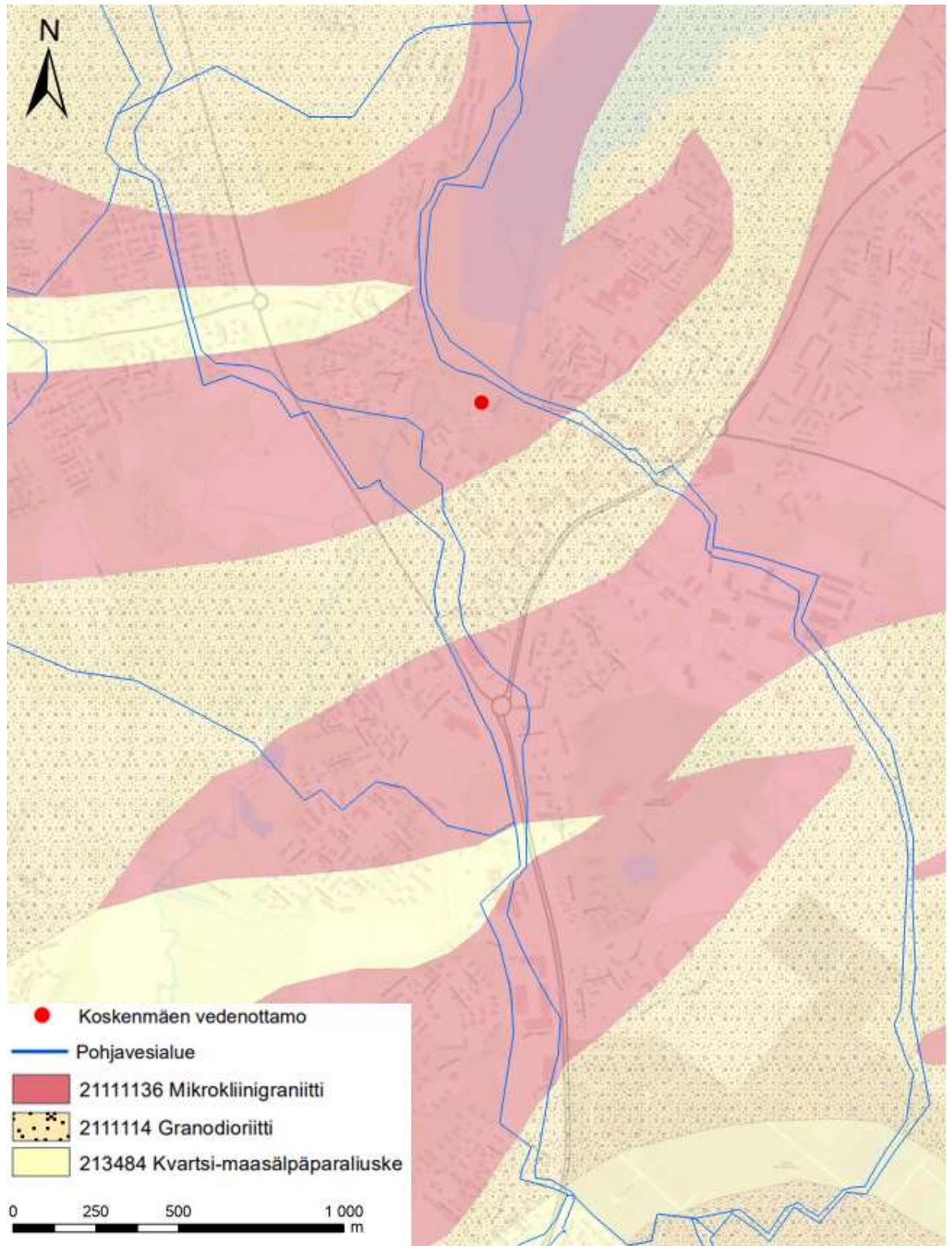
Tutkimusalueena on Hyrylän pohjavesialue, joka sijaitsee Etelä-Suomessa keski-Uudellamaalla Tuusulassa. Pohjavesialueen keskiosissa toimii Keski-Uudenmaan Vesi Kuntayhtymän Koskenmäen vedenottamo. Hyrylän 1-luokan pohjavesialue (tunnus 0185801) on jaettu pohjoiseen (A) ja eteläiseen (B) osaan, joita erottaa Sulan teollisuusalueella pohjavedenpinnan yläpuolelle nouseva kalliokynnys (Breilin et al. 2005) (Kuva 1.). Tässä tutkimuksessa tutkimusalue rajoittuu pohjavesialueen A osaan Koskenmäen vedenottamon lähistölle. Hyrylän pohjavesialue mukailee luode–kaakkosuuntaista harjua, joka on osa Hyvinkäältä I-Salpausselältä lähtevää harjujaksoa (Breilin et al. 2005). Hyrylän pohjavesialue sijoittuu Tuusulanjärven etelärannalle, josta myös Tuusulanjoki saa alkunsa. Tuusulanjoki virtaa Hyrylän pohjavesialueen läpi kohti etelää ja laskee lopulta Vantaanjokeen. Breilin et al. 2005 rakenneselvityksen mukaan Tuusulanjärvi ja -joki sijoittuvat lounas–koillissuuntaiseen Pikkalan (Porkkalan) – Lahden murroslaaksoon, johon on viimeisen mannerjäätikön sulamisen seurauksena kerrostunut paksu maanpeite. Murroslaaksossa kallion pinta on hyvin matalalla, minkä seurauksena myös pohjaveden pinta on murroslaaksossa hyvin matalalla muuhun pohjavesialueen pohjaveden pintaan verrattuna. Paksu maakerros murroslaaksossa kuitenkin tarjoaa paljon tilaa pohjavedelle, joten pohjavesivyöhyke on siellä myös paksuimmillaan.



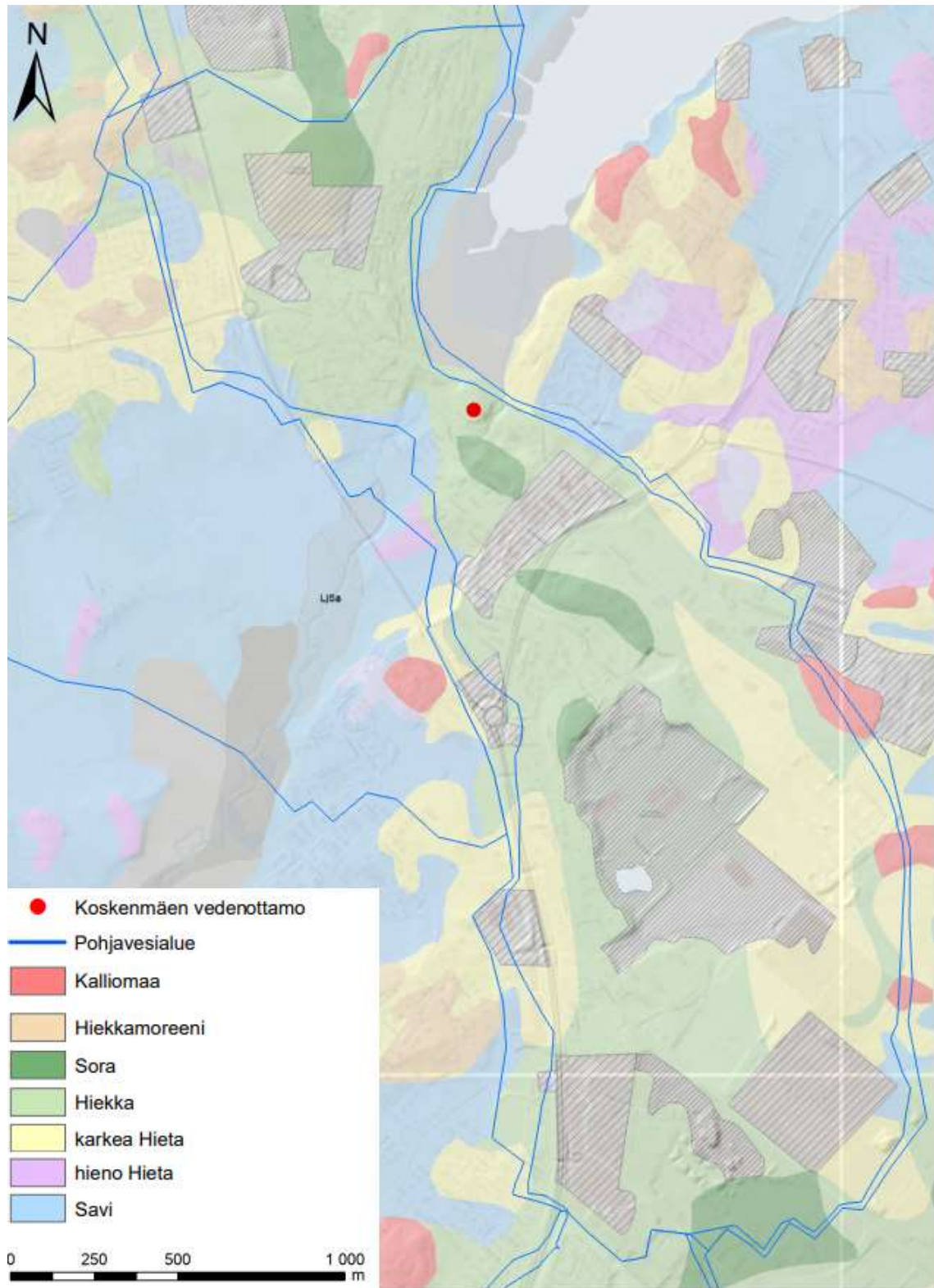
Kuva 1. Hyrylän pohjavesialue ja päävirtaussuunnat. Pohjavesialueita jakavat kalliokynnykset ovat merkitty punaisella viivalla. Merkittävä maaperän ja pohjaveden pilaantuminen on merkitty karttaan mustalla ympyrällä (Kivimäki ja Luodeslampi 2019). Pieni kartta: Maanmittauslaitos, karttapaikka -palvelu.

Hyrylän pohjavesialueen kallioperä kuuluu svekofenniseen vuorijonovyöhykkeeseen, jossa pääkivilajeja ovat voimakkaasti migmatiittuneet graniitit, kvartsi- ja granodioriitit sekä kvartsi- ja maasälpägneissit (Breilin et al. 2005) (Kuva 2). Jokilaaksossa murroslaakson lisäksi alueen kallioperässä on ruhjeita, joiden pääsuunnat ovat lounas-koillinen, kaakko-luode ja pohjoinen-etelä. Ruhjeilla voi olla merkittävä vaikutus Hyrylän alueen pohjavesiin, sillä ne sekä kuljettavat että säilövät pohjavettä (Breilin et al. 2005). Ruhjeiden ansioista Koskenmäen vedenottamolla pumpattu vesi saattaa olla peräisin myös Hyrylän pohjavesialueen ulkopuolelta. Hyrylän pitkittäisharjussa maa-aines on pohjavedenpinnan yläpuolella deltalle tyypillisesti hiekkavaltaista ja hiekka on muinaisen jäätikön reunasta poispäin (etelään) hienonevaa (Kuva 3). Pohjaveden pinnan alapuolinen aines on pääosin karkeaa hiekkaa ja soraa (Breilin et al. 2005). Murroslaaksossa on paksu kerros moreenia, jonka ylle sora- ja hiekkakerrokset ovat muodostuneet. Harjumuodostuman reunoilla idässä, etelässä ja lännessä tavataan kallio-, moreeni, ja savialueita (Breilin et al. 2005). Savialueet patoavat helposti vettä, mutta Hyrylässä pohjavesialueella pohjavesi pääsee kulkemaan niiden alapuolisissa maakerroksissa.





Kuva 2. Kallioperäkartta Hyrylän pohjavesialueesta. Kallioperä tiedot: GTK:n Hakku -palvelu, Suomen Kallioperä 1:200 000.



Kuva 3. Maaperäkarta Hyrylän pohjavesialueesta. Maaperätiedot: GTK:n Haku -palvelu, Maaperä 1:20 000.

Avoin tietopalvelun pohjavesitietojärjestelmän (POVET) mukaan Hyrylän A pohjavesialue on pinta-alaltaan 3,70 km<sup>2</sup> ja sen muodostumisalueen pinta-ala on 3,25 km<sup>2</sup>. Muodostuvan pohjaveden määrän on arvioitu olevan 2600 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>, kun se on laskettu imeytymiskertoimen ja vuotuisen sadantamäärän perusteella (POVET). Pöyry on kuitenkin antoisuusselvityksessään (2018) arvioinut pohjaveden muodostusmääräksi vain 1500 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>, kun on otettu huomioon muodostumisalueen tiivis rakentaminen ja vettä läpäisemättömät pinnat ja asfaltoidut alueet. Hyrylän ja Rusutjärven suojelusuunnitelmassa (Kivimäki ja Luodeslampi 2019) arvioidaan kuitenkin pintavesi-pohjavesi vuorovaikutuksen sekä ruhjevyöhykkeiden lisäävän pohjaveden muodostumista ainakin kausittain, jolloin alueen antoisuus voi todellisuudessa olla suurempikin kuin POVETIN ja Pöyryn (2018) arviot.

Päävirtaussuunnat Hyrylän A pohjavesialueella ovat kalliokynnysten aiheuttamista paikallisista vaihteluista huolimatta kohti Koskenmäen vedenottamo ja murroslaaksoa, jossa pohjaveden pinta on +35 – +36 mpy (Breilin et al. 2005 ja Keskitalo 2018). Breilin et al. (2005) rakenneselvityksen mukaan A- alue rajautuu pohjoisessa ja etelässä oleviin kalliokynnyksiin, joissa pohjaveden pinta on myös korkeimmillaan sen ollessa Sulassa +54 mpy ja Ristikivellä n. +55 - +60 mpy. Hyrylässä maanoton seurauksena pohjaveden pinta on suhteellisen lähellä maanpintaa, alimmillaan neljän metrin syvyydessä (Breilin et al. 2005).



#### 4. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

Kallionpinta on Hyrylässä murroslaakson alueella hyvin syvällä ja kalliossa on havaittu paljon rakoilua sekä kalliokynnyksiä (Breilin et al. 2005). 3D -hydrostratigrafisen rakennemallin tekemistä varten piti selvittää kallionpinnan tarkempaa muotoa ja korkeutta maatutkaluotauksen ja kairaustietojen avulla. Maatutkaluotaus antaa tietoa maaperän kerrosrakenteesta ja parhaassa tapauksessa sen avulla voidaan paikantaa kallionpinnan korkeutta sekä pohjaveden pinnankorkeutta (Jol 2009). Hyrylässä on monta pohjaveden havaintoputkea, joiden kairaus- sekä pohjaveden pinnankorkeustietoja voitiin käyttää maatutkaluotausprofiilien tulkinnassa apuna. Myös Tuusulan kunnalla oli rakennusprojekteihin liittyviä kairaustietoja, joiden maalajihavaintoja voitiin käyttää 3D-mallinnuksessa hyväksi.

Pintavesien ja pohjavesien välistä vuorovaikutusta tutkittiin lämpökamerakuvauksella, suotovirtaamamittauksin, minipietsometreillä ja vesianalyysin. Lämpökamerakuvaukset käsikäyttöisellä lämpökameralla auttoivat paikantamaan mahdollisia pohjaveden purkauskohia, joista myöhemmin tehtiin tarkempia tutkimuksia minipietsometrin ja suotovirtaamamittauksien avulla. Apuna pohjavesien purkauskohien paikantamiseen käytettiin myös sedimenttilämpötilamittaria, jolla voitiin paikan päällä tarkistaa Tuusulanjoen pohjasedimentin lämpötila. Suotovirtaamamittauksilla mitattiin pintaveteen purkautuvan pohjaveden määrää tietyllä ajanjaksolla pistemäisesti. Minipietsometrillä otettiin näytteitä pintaveteen purkautuvasta pohjavedestä ja samalla havainnoitiin pohjaveden vertikaalihydraulista korkeutta.

Hyrylän pohjaveden havaintoputkista, jokeen purkautuvasta pohjavedestä ja Tuusulanjoesta otettiin vesinäytteitä kattavasti koko tutkimusalueelta. Vesinäytteistä analysoitiin hapen ja vedyn stabiilit isotoopit, pääionit ja hivenaineet. Näytteenoton yhteydessä ja myöhemmin laboratoriossa vesinäytteistä mitattiin myös pH ja sähkönjohtavuus. Pohjaveden havaintoputkista mitattiin pohjaveden pinnankorkeudet, joita käytettiin 3D-mallinnuksessa ja apuna pohjaveden virtausmallin tekemisessä.

Hyrylän pohjavesialueesta tehtiin 3D-hydrostratigrafinen rakennemalli auttamaan pohjavesialueen geologisen rakenteen ymmärtämisessä. 3D-rakennemallin avulla voidaan tarkastella alueen geologista rakennetta 3D:na ja ottaa esimerkiksi mallista poikkileikkauskuvia halutuilta linjoilta. Hyrylän pohjavesialueesta tehtiin myös pohjaveden virtausmalli, jonka avulla tutkittiin pohjaveden virtaussuuntia, pohjaveden liikkeitä murroslaaksossa sekä Koskenmäen vedenottamon kaivon sieppausaluetta.

#### 4.1. Tausta-aineisto

Kenttätutkimuksien tueksi, 3D-hydrostratigrafista rakennemallia ja pohjaveden virtausmallia varten kerättiin aineistoa avoimista paikkatiedon jakelupalveluista ja saatavilla olevista tutkimusraporteista sekä rakenneselvityksistä. Tietoa kerättiin myös Hyrylän pohjavesialueen toimijoilta kuten Keski-Uudenmaan Vesi Kuntayhtymältä ja Tuusulan kunnalta. Aikaisemmat tutkimukset Hyrylän pohjavesialueella ja avoin paikkatieto mahdollistivat kenttätöiden tarkan suunnittelun ja helpottivat tarkemman rakenne- ja virtausmallin tekemisessä. Tässä tutkielmassa käytetyt kartat ovat tehty QGIS 3.12.3 ja Esri ArcMap 10.8 -ohjelmistoilla. Taulukoissa 1, 2 ja 3 ovat eriteltynä käytetyt aineistot eri työskentelyvaiheissa.

Taulukko 1. Kartoissa käytetyt aineistot.

Aineisto	Lähde	Lisätietoja
Taustakartta	OpenStreetMap	QGIS:n tarjoama taustakartta
Taustakartta	WorldStreetMap	ArcMAP:n tarjoama taustakartta
Pohjavesialue	SYKE – Avoin tieto	Vedenhankintaa varten kartoitetut ja luokitellut pohjavesialueet
Havaintoputket ja vedenottamot	Ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertta (POVET)	Sijaintitiedot
Maaperäkartta	GTK – Hakku	1:20 000/1:50 000
Kallioperäkartta	GTK – Hakku	1:200 000

Taulukko 2. 3D- rakennemallissa käytetyt aineistot.

Aineisto	Lähde	Lisätietoja
Havaintoputkikortit	Keski-Uudenmaan Vesi Kuntayhtymä	Maalajitiedot ja kalliovarmenteet
Korkeusmalli DEM	Maanmittauslaitos	Kahden metrin resoluutio
Painovoimalinjat	GTK - Rakenneselvitys	Kallionpinta
Järvet ja joet	SYKE – Avoin tieto	Tuusulanjärven ja -joen rajat

Taulukko 3. Virtausmallissa käytetyt aineistot.

Aineisto	Lähde	Lisätietoja
Pohjaveden muodostumisalue	SYKE – Avoin tieto	Vedenhankintaa varten kartoitetut ja luokitellut pohjavesialueet
Kaivon päivittäiset pumppaus määrät	Keski-Uudenmaan Vesi Kuntayhtymä	Koskenmäen kaivo
Vuosittaiset sademäärät	Ilmatieteenlaitos	Helsinki-Vantaa lentokentän havaintopiste
MODFLOW ja MODPATH	USGS	Virtausmallinnuskoodit

Kartoissa käytettiin taustakarttana QGIS:n OpenStreetMap ja ArcMAP:n tarjoamaa WordlStreetMap karttapohjaa. Karttoihin ja malleihin tuodut pohjavesialueen rajat ja muodostumisalue sekä Tuusulanjärven ja -joen paikkatiedot perustuivat Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) avoin tieto palvelun dataan. GTK:n Hakku-palvelusta saatiin maaperä- ja kallioperäkartta karttoihin ja rakennemallin tueksi. Topografia 3D-rakennemalliin saatiin Maanmittauslaitoksen digitaalisesta korkeusmallista (DEM, Digital Elevation Model), joka perustuu LiDar laserkeilausaineistoon.

Alueen pohjavesiputkien sijaintitiedot tuotiin pohjavesitietojen hallintajärjestelmä Hertasta, joka käyttää mm. pohjavesitietojärjestelmän (POVET) tietoja. Putkikortit, Koskenmäen vedenottamon ja pohjavedenpinnan seurantaliedot kerättiin Keski-Uudenmaan Vesi Kuntayhtymän tietokannasta EMMI- palvelusta ja Aquarex seurantaohjelmasta. Putkikorttien tietoa käytettiin suurimmilta osin vain

pohjavesinäytteenoton tukena, mutta joissain putkikorteissa oli myös tietoa maalajeista sekä kalliovarmenne. Näitä tietoja voitiin käyttää apuna 3D-rakennemallin tekemisessä.

Pohjavesialueen 3D-rakennemalliin kallion pinta hahmoteltiin GTK:n rakenneselvityksen yhteydessä tehtyjen painovoimamittausten avulla. Painovoimamittaukset perustuvat tiheys eroihin, joten tiheä kallio voitiin hyvin erottaa maanpeitteestä (Breilin et al. 2005). Maaperän kerrostiedot ja maalajit saatiin Tuusulan kunnalta rakennushankkeiden yhteydessä tehtyjen painokairausten tiedoista. Painokairaus on staattinen kairausmenetelmä, jossa kairaa kuormittamalla erisuuruisilla painoilla ja kiertämällä määritellään maaperän kerrosrajoja (Kairausopas 1981).

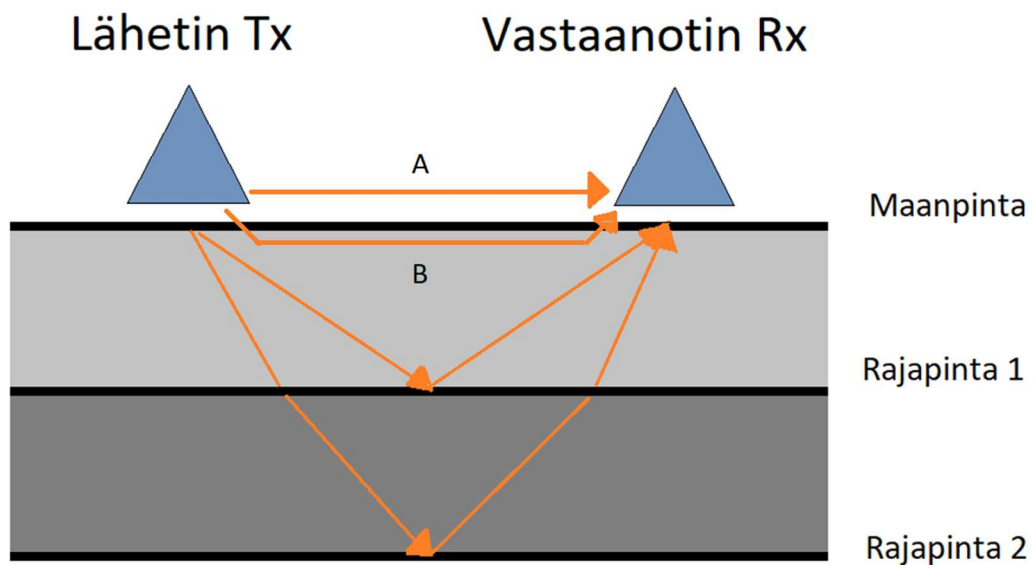
#### **4.2. Maatutkaluotaus**

Maatutkaluotain (eng. Ground penetrating radar, GPR) on ainetta rikkomaton, maaperän kerrosrakenteen tutkimiseen käytetty geofysikaalinen tutkimusmenetelmä, joka kerää tietoa maaperästä ja sen kerroksista sähkömagneettisten aaltojen avulla (Reynolds 2011). Maaperässä väliaineen ominaisuudet vaikuttavat sähkömagneettisen aallon etenemiseen ja erilaiset kerrokset maaperässä muodostavat rajapintoja, jotka heikentävät ja heijastavat sähkömagneettisia aaltoja (Jol 2009). Maatutkan toiminta perustuu siihen, että se rekisteröi jostain rajapinnasta takaisin heijastuneen sähkömagneettisen aallon amplitudin ja ajan (nanosekunneina), joka aallolla on kestänyt kulkea edestakaisin (Reynolds 2011). Kun tutkaa vedetään maanpinnalla ja se on koko ajan liikkeessä, saadaan sen keräämän datan perusteella luotua poikkileikkauskuva maaperän kerrostuneisuudesta. Maatutkaluotauksen avulla voidaan myös tunnistaa pohjaveden pinta ja kallionpinnan taso sekä karkeasti joitain maalajeja.

Maatutkaluotauksessa yleisesti käytetty taajuusalue on 10 – 3000 MHz ja mitä pienempi on taajuus, sitä suurempi on mittaussignaalin syvyysulottuvuus (Reynolds 2011). Korkeataajuisten antennien erottelukyky on kuitenkin heikko, koska niiden lähettämien sähkömagneettisten pulssien aallonpituus on pieni (Bristow ja Jol 2003). Korkeat taajuudet ovat siis hyviä tunnistamaan erilaisia maalajeja tai pohjaveden pinnan, kun taas pienemmällä taajuudella saadaan paljon suurempi syvyysulottuvuus. Maatutkasignaali vaimenee syvemmälle maaperään mentäessä sekä väliaineen sähkönjohtavuuden kasvaessa. Hienorakeisilla maalajeilla on hyvä sähkönjohtavuus, jolloin hienorakeiset maalajit vaimentavat maatutkasignaalia voimakkaasti (Bristow ja Jol 2003). Esimerkiksi

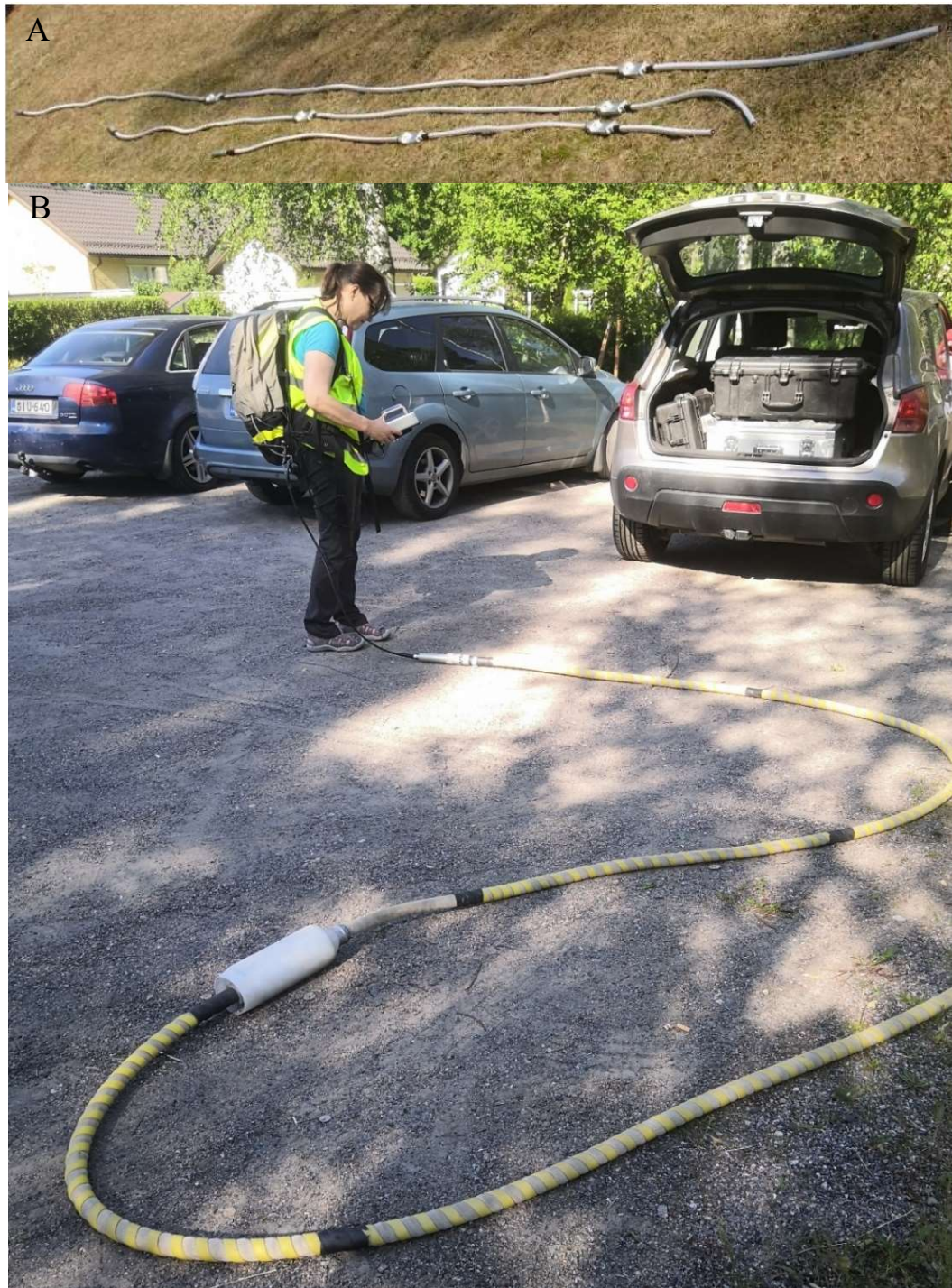
savikerrokset maaperässä voivat rajoittaa maatutkasignaalin syvyyssulottuvuutta paljonkin, jolloin savikerroksen alapuolisia kerroksia on vaikea määrittää maatutkan avulla. Kun maaperässä on paljon vettä, voi maatutkasignaalin nopeus väliaineessa hidastua (Reynolds 2011).

Maatutkaluotain lähettää antenniensa avulla sähkömagneettisia pulsseja maaperään. Pulssit ovat lyhyitä, noin yhdestä kuuteen nanosekuntia ja kulkevat maaperässä melkein valon nopeudella. Pulssi kulkee maaperässä vertikaalisesti ja osa siitä heijastuu takaisin maaperän kerroksien rajapinnoilta, kun taas osa taittuu ja jatkaa matkaansa heijastuen myöhemmiltä rajapinnoilta (Kuva 4). Heijastuneen aallon amplitudi määräytyy rajapinnan heijastuskertoimen perusteella. Heijastuskerroin riippuu rajapinnan muodostavien kerrosten suhteellisista permittiivisyyksistä (Neal 2004). Maatutkassa on kaksi antennia, lähetin (Tx) ja vastaanotin (Rx), joista lähetin lähettää sähkömagneettisia pulsseja maankamaraan ja vastaanotin rekisteröi rajapinnoilta heijastuneet pulssit (kuva). Maatutka mittaa heijastuneen pulssin amplitudin ja edestakaiseen matkaan kuluvan kulkuajan, jolloin amplitudi voidaan esittää kulkuajan funktiona (Jol 2009). Maatutkaa vedetään maanpinnalla, jolloin saadaan jatkuva luotausprofiili, jossa näkyvät muun muassa rajapintojen voimakkuus ja syvyys. Toisin sanoen erilaisten maalajikerrosten laatu ja paksuus.



Kuva 4. Sähkömagneettisten pulssien kulku maaperässä lähettimestä vastaanottiin sekä aaltojen heijastuminen eri rajapinnoilta.

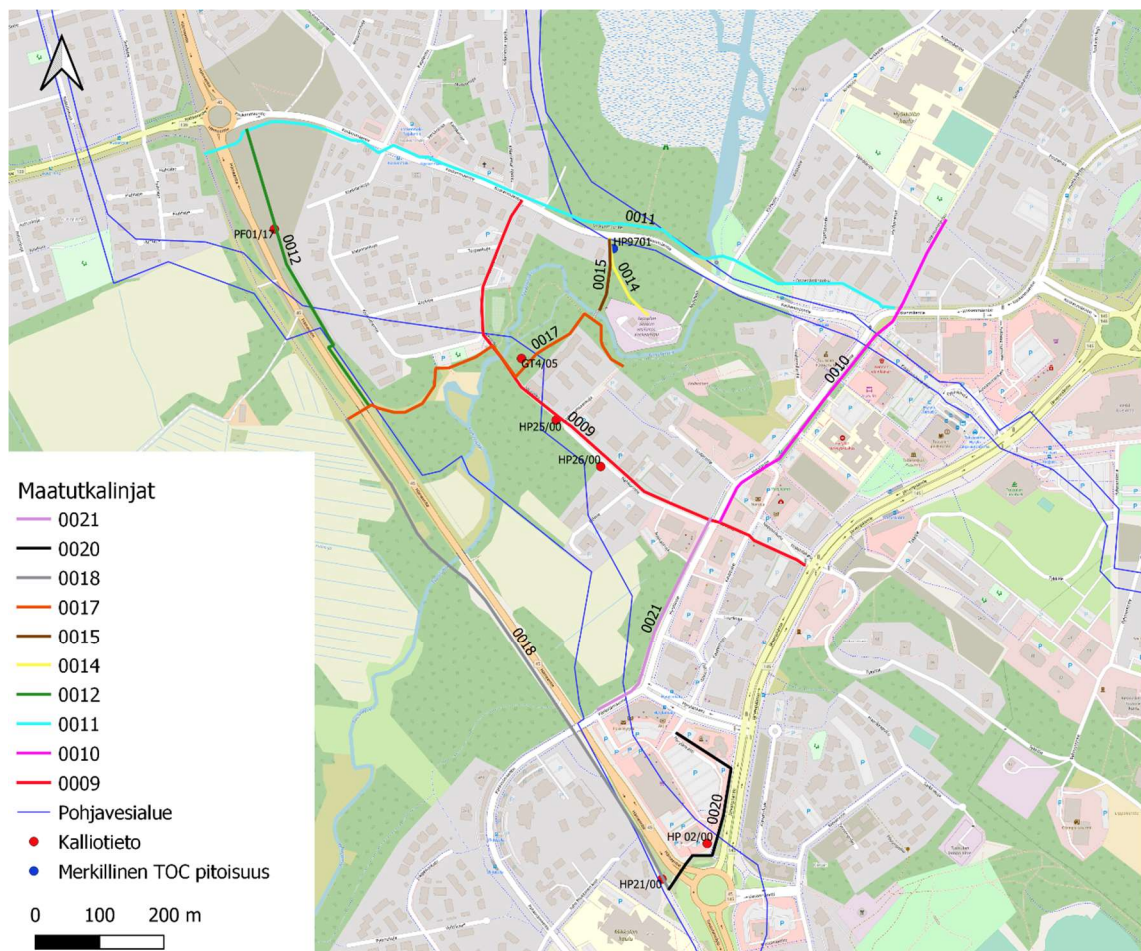
Maatutkaluotaus suoritettiin käyttäen Helsingin yliopiston MALÅ Professional Explorer (ProEx) ohjausyksikköä, johon kuuluu kaksi moduulinen MALÅ XV monitori ja siihen liitettävä antenni. Tässä tutkimuksessa käytettiin 30 MHz mahdollisimman suuren syvyysulottuvuuden varmistamiseksi. Monitorin avulla voitiin säätää asetuksia ja tutkia näytön kautta tuloksia myös paikan päällä. Lisäksi laitteistoon kytkettiin GPS- paikannin. Ohjausyksikkö ja antennit ovat kiinnitettynä reppuun, jota käyttäjä kantaa selässään (Kuva 5). Antennit olivat asennettu linjaan peräkkäin, missä lähetin kulkee edellä ja vastaanotin perässä (MALÅ Geoscience AB. 2011). Tällaisia linjaan kytkettyjä antennoja kutsutaan vaikeakulkuisen maaston antenniksi (eng. rough terrain antennas). Ne ovat erityisesti suunniteltu sedimenttiluotaukseen vaikeakulkuisissa maastoissa, kuten metsissä tai soilla (MALÅ Geoscience AB. 2011). Maatutkaluotain mittaa mittauspisteiden välimatkaa joko ajan tai matkan perusteella (Reynolds 2011). Tässä tutkimuksessa käytettiin aikaan perustuvaa (eng. time triggering) mittausten menetelmää, jossa antenni lähettää sähkömagneettisia pulsseja tietyin aikavälein.



Kuva 5. A: Erimittaisia ja -taajuuksisia "rough terrain" antennneja (MALÅ Geoscience AB. 2011, kuva 6.1). B: 30MHz antenni kiinnitettynä käyttäjän selkärepassa olevaan moduuliin. Kuva: Tuuli Hankaankorpi.



Maatutkaluotaus suoritettiin torstaina 25.6.2020 Hyrylän keskustan alueella. Luotauslinjat suunniteltiin etukäteen kallionpinnantietojen ja aikaisempien tutkimusten tietojen pohjalta. Havaintoputkessa HP9701 on aikaisemmissa tutkimuksissa (Lindgren ja Kivimäki 2019) havaittu merkillisiä orgaanisen hiilen pitoisuuksia (TOC, total organic carbon), joten maatutkaluotauslinjat suunniteltiin kulkemaan sen läheltä. Maatutkalla haluttiin pääasiassa tunnistaa pohjaveden- ja kallion pinnan korkeuksia ja mahdollista kallioperän rakoilua. Tutkimuspäivänä vedettiin yhteensä 10 linjaa, jotka ovat nimetty mittalaitteiston antamien tiedostonimien mukaan 0009, 0010, 0011, 0012, 0014, 0015, 0017, 0018, 0020 ja 0021 (Kuva 6). Tarkoituksena oli saada profiilit kulkemaan harjun reunoja pitkin (linjat 0011, 0012 ja 0018) sekä kaksi leikkausta harjun poikki (linjat 0015, 0017, 0021 ja 0010).



Kuva 6. Maatutkaluotauslinjat Hyrylässä. Punaisella on merkitty pohjavesiputket, joissa kalliovarmenne ja sinisellä havaintoputki, jossa on aiemmin havaittu merkillisiä TOC pitoisuuksia.



#### 4.2.1. Luotausprofiilien käsittely Reflexw -ohjelmalla

Maatutkaan asennettu GPS- laite mittaa linjan koordinaatit ja korkeudet, mutta koordinaatit ovat usein maantieteelliset EUREF\_FIN koordinaatit ja korkeus hyvin epätarkka. Maatutkaluotaus aineistoa prosessoitiin korjaamalla koordinaatit ja maanpinnan taso jo ennen sen vientiä Reflexw- käsittelyohjelmaan. Koordinaatit korjattiin Maanmittauslaitoksen tarjoaman Paikkatietoikkuna- verkkosivun avulla tasokoordinaateiksi. Maanpinnan topografia korjaus tehtiin maanmittauslaitoksen tarjoaman korkeusmallin avulla QGIS paikkatieto-ohjelmassa. Koordinaatti- ja topografiakorjatut tiedostot käsiteltiin Reflexw- ohjelmalla tulkittavampaan muotoon. Käsittelyssä tehtiin seitsemän erilaista työvaihetta, jotka ovat esitelty Taulukossa 4.

Taulukko 4. Maatutkaprofiilien käsittelyn seitsemän vaihetta Reflexw- käsittelyohjelmalla.

Vaihe/toiminto	Sisältö
1. Amplitudikorjaus/ Remove DC shift	Korjaa mittalaitteiston aiheuttaman amplitudivaihtelun nollatason siirtymän
2. Taajuuskorjaus/ Dewow	Poistaa mittalaitteiston aiheuttaman matalataajuisen häiriön
3. Aloitusajan siirto/ Static correction/muting	Korjaa aineiston nollatason vastaamaan maanpintaa
4. Signaalin vahvistaminen/ Gain, manual gain (y)	Vahvistaa syvältä tulevien aaltojen amplitudia
5. Suorien aaltojen poisto/ Background removal	Vaimentaa ilmassa ja maanpinnassa suoraan edenneiden aaltojen amplitudia
6. Kaistasuodatus/ Bandpass frequency	Vaimentaa profiilien taustakohinaa
7. Topografiakorjaus/ correct 3D topography	Liittää topografian profiliin

Tarkkaa kallionpinnan tietoa oli saatavilla alueen havaintoputkien putkikorteista, joissa kairaus on suoritettu kallion asti. Kenttätutkimusten yhteydessä tehtyjä pohjaveden pinnankorkeustietoja pystytiin käyttämään apuna tulkinnassa. Aikaisempi varmistettu kallion- tai pohjaveden pinnankorkeustieto auttoi tulkitsemaan maatutkaluotausprofiileja ja varmistamaan rajapintoja.

### 4.3. Termiset menetelmät

Lämpötila-anomaliaita voidaan käyttää apuna pintavesiin purkautuvan pohjaveden tutkimisessa. Jos pintaveteen purkautuu pohjavettä, se yleensä näkyy lämpötilapoikkeamana pintaveden keskilämpötilasta (Torgersen et al. 2001). Pohjaveden lämpötila Suomessa vaihtelee noin 3,5 – 6,6 °C välillä (Backman et al. 2009). Tässä tutkimuksessa käytettiin pohjaveden purkautumisen tutkimiseen lämpökameraa sekä sedimenttilämpötilamittaria. Lämpökamerakuvaus auttoi paikantamaan mahdollisia pohjaveden purkautumiskohtia nopeasti veden pinnalta ja sedimentin lämpötilamittauksella voitiin tarkistaa, oliko lämpötilaero joen pohjasedimentissä tarpeeksi suuri mahdolliselle pohjaveden purkautumiskohdalle.

#### 4.3.1 Käsikäyttöinen lämpökamera

Käsikäyttöisellä lämpökameralla voidaan tarkastella pintavesien pintalämpötiloja ja etsiä anomaliaita helposti ja nopeasti tutkimuskohteella vedenpinnan yläpuolelta. Paras ajankohta lämpökamerakuvaukseen Suomessa on heinä-elokuussa, kun pintavesien lämpötila on korkeimmillaan ja pohjaveden lämpötila vaihtelee välillä +6 - +8 °C (Kivimäki et al. 2013). Lämpökamera ottaa infrapunakuvia, joiden avulla voidaan heti paikan päällä nähdä lämpötila-anomaliaita. Lämpökamera mittaa lämpösäteilyn vain 0,1 mm syvyydeltä vedenpinnasta, joten sillä ei voida tutkia esimerkiksi vesialtaan pohjalle purkautuvan pohjaveden määrää tai syvyysprofiilia (Torgersen et al. 2001).

Maanantaina 29.6.2020 suoritettiin Tuusulanjoella Koskenmäen vedenottamon läheisyydessä lämpökamerakuvausta pohjavesien purkauskohtien tunnistamiseksi. Lämpötilamittaukset suoritettiin Helsingin yliopiston lämpökameralla (FLIR E4). Purkauskohdat merkittiin karttaan helpottamaan seuraavan viikon kenttätutkimuksia. Sää oli kuvaushetkellä hyvin lämmin ja Tuusulanjoen pintalämpötila vaihteli 21 – 23 °C välillä. Joen vedenpinta oli hyvin alhainen kesäkuun kuivuuden takia, mikä helpotti huomattavasti purkauskohtien löytämistä lämpökameralla.

#### 4.3.2. Tuusulanjoen pohjasedimentin lämpötilamittaus

Ennen pohjaveden näytteenottoa ja suotovirtaamamittauksia tarkistettiin pohjaveden purkauskohdat vielä sedimenttilämpötilamittarilla (Kuva 7). Lämpötilamittarissa on noin 1,5 metriä pitkä metallinen tikku, jonka toisessa päässä on lämpötila-anturi ja toisessa päässä kahva asentamista varten. Mittatikku asennetaan noin kolmen senttimetrin syvyyteen sedimenttiin ja annetaan olla, kunnes lämpötila mittarin näytöllä ei enää muutu. Sedimenttilämpötilamittarin avulla tehtiin myös lämpötilaprofiili joen pohjasta. Tuusulanjoen pohjasedimentin lämpötilaprofiilia varten tehtiin pohjasedimentin lämpötilamittaus 16.7.2020. Mittauspisteitä oli yhteensä 28, jotka olivat sijoitettu noin metrin välein toisistaan.



Kuva 7. Lämpötilamittaus Tuusulanjoella sedimenttilämpötilamittarilla. Näytöllä lukeva lämpötila 7.5 °C poikkeaa huomattavasti joen keskilämpötilasta, joka on n. 18 °C, joten pohjasedimentin läpi voidaan tulkita purkautuvan pohjavettä. Kuva: Kirsti Korkka-Niemi

#### 4.4. Suotovirtaamamittaus

Suotovirtaamamittarilla (eng. seepage meter) voidaan tutkia pintaveteen pohjasedimenttin läpi suotautuvan pohjaveden määrää ja nopeutta tiettyä pinta-alaa kohden (Rosenberry ja LaBaugh, 2008). Suotovirtaamamittari asennettiin pintavesialtaan pohjaan, missä se kerää pohjan sedimenttien läpi suotautuvaa pohjavettä mittapussiin. Pussin tilavuuden muutos kuvaa pohjavedestä pintaveteen suotautuvan veden määrää tietyllä ajanjaksolla (Rosenberry ja LaBaugh, 2008).

Suotovirtaamamittari on muovinen tai metallinen tynnyri, jonka yläpinnassa on ilmanpoistovenkki mittarin asentamista helpottamaan ja sylinterin reunassa on liitäntä mittauspussille (Kuva 8). Ilmanpoistovenkki pidettiin suljettuna asennuksen jälkeen koko mittauksen ajan. Suotovirtaamamittari asennettiin niin, että mittauspussi oli suunnattu joen virtauksen suuntaisesti. Mittapussi on asennettuna vain mittauksen ajan ja muulloin liitäntä on auki, jolloin pohjavesi virtaa siitä normaalisti läpi sekoittuen pintaveteen. Mittauslaitteen asentamisen helpottamiseksi tynnyrin leikkauspinta on sahalaitainen ja sen asentaminen sedimenttiin onnistui parhaiten sahaavalla liikkeellä. Kun suotovirtaamamittari oli asennettu pintavesialtaan pohjaan, sen annettiin olla paikallaan noin tunnin verran, jotta sedimentti ja pohjaveden purkautuminen tasapainottuivat taas normaaliin tilaansa asentamisen jälkeen (Rosenberry ja LaBaugh, 2008).

Suotovirtaamamittaukset suoritettiin niin, että mittapussiin laitettiin ensin 200 millilitraa siemenvettä, joka lopulta vähennettiin lopullisesta mittapussin tilavuuden muutoksesta. Mittapussi täyttyy parhaiten luonnollisella purkautumisnopeudella, kun siemenvesi 3,5 litraisessa pussissa on 100-200 ml (Murdoch ja Kelly 2003). Mittausaika oli jokaisessa mittauksessa 240 sekuntia, ja mittauksia tehtiin samasta kohtaa kolme, jotta voitiin varmistua mittauksen onnistumisesta. Kun eri mittauksen tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, niiden keskiarvo kertoo parhaiten tuloksen, joka on lähimpänä totuutta.



Kuva 8. Pohjaveden suotauman mittaamista suotovirtaamamittarilla. Tynnyrin päällä oleva ilmanpoistventtiili on tukittu ja mittapussi näkyy asennettuna kuvan yläreunassa. Kuva: Tuuli Hankaankorpi

Suotovirtaamamittaukset suoritettiin Tuusulanjoella 7.7.2020. Suotovirtaamamittarit asennettiin Koskenmäen vedenottamon läheisyyteen joen pohjaan niihin kohtiin, joissa lämpötilamittausten perusteella purkautui pohjavettä. Mittareita asennettiin yhteensä neljä (SM1, SM2, SM3 ja SM4). SM1 - SM3 asennettiin melko lähelle toisiaan kohtaan, jossa havaittiin paljon pohjaveden purkautumispaikkoja ja SM4 muista hieman Tuusulanjoen alajuoksuun. Mittauspaikkojen sijainnit näkyvät kuvassa 17.

Suotauman virtaama  $Q$  voidaan laskea, kun tiedetään suotauma ja mittauslaitteen pinta-ala. Mittauslaitteen pinta-ala voidaan laskea ympyrän pinta-alan laskukaavalla, kun tiedetään mittalaitteen säde  $r$  (Kaava 1).

$$A = \pi r^2 \quad (1)$$

Suotauma saadaan selville mittauspussin tilavuuden muutoksesta ja suotauman virtaaman ( $Q$ ) laskukaava on (Rosenberry ja LaBaugh, 2008):

$$Q = \frac{V(final) - V(initial)}{t \times A} \quad (2)$$

missä  $t$  = mittausaika,  $V(final)$  = mittauspussin veden lopullinen tilavuus ja  $V(initial)$  = pussissa aloitushetkellä olleen veden tilavuus (siemenvesi).

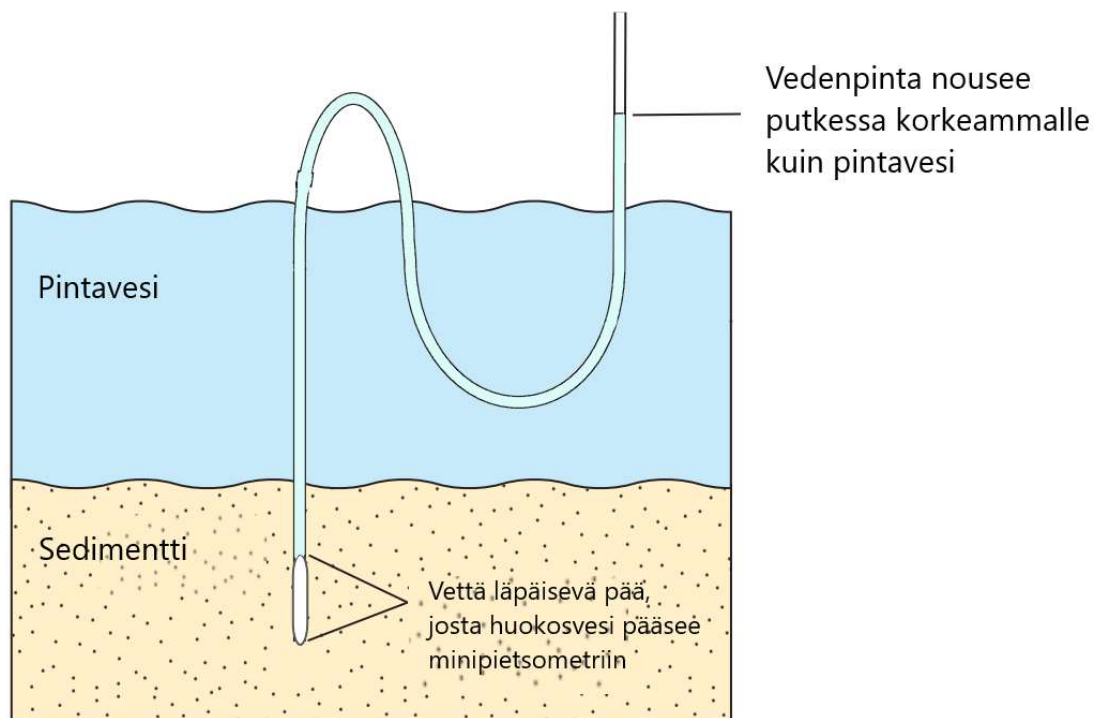
#### 4.5. Minipietsometri

Minipietsometrin (eng. minipiezometer) avulla voidaan ottaa näytteitä pintaveteen pohjasedimentin kautta purkautuvasta pohjavedestä. Minipietsometri asennettiin pohjasedimenttiin metallisen asennusputken avulla, joka asennettiin halutulle syvyydelle Tuusulanjoen pohjasedimenttiin. Näytteenotossa käytettiin apuna sedimenttilämpötilamittaria, jonka avulla valittiin joen pohjasedimentistä selvä pohjaveden purkautumiskohta. Metalliputken päähän sijoitettiin tulppa, joka esti sedimentin pääsyn putkeen ja sitä kautta myös minipietsometriin. Tulppa hakattiin ohuella metallitikulla pois ennen minipietsometrin pujotusta metalliputkeen. Minipietsometri on muovinen letku, jonka päässä on sukkulamainen rei'itetty siiviläosa, josta joen pohjasedimentin huokosissa oleva pohjavesi pääsee minipietsometriin. Letku pujotettiin metalliputken läpi pohjasedimenttiin, minkä jälkeen metalliputki poistettiin ja minipietsometri jäi paikalleen sedimenttiin. Minipietsometrin reikäisestä päästä



sedimentin huokostiloissa oleva pohjavesi nousee minipietsometrin letkuun, josta vettä pumpattiin letkusta imemällä sitä ruiskulla. Minipietsometrin päässä on suodatinverkko niin, että se pystyy suodattamaan suurimpia hiukkasia ja hienoa maa-ainesta.

Minipietsometri on helppoin asentaa ja toimii hyvin hienossa hiekassa ja karkeammissa materiaaleissa (Rosenberry ja LaBaugh, 2008). Todella hienot maa-ainekset, kuten savet ja siltit, vaikeuttavat veden pääsyä ja pumppaamista minipietsometrin läpi. Tutkitulla jokiosuudella Tuusulanjoen pohjasedimentti oli hyvin karkeaa, joten minipietsometrin asennus oli helppoa. Isot kivet tai liian karkea materiaali saattavat myös vaikeuttaa metalliputken asennusta riittävälle syvyydelle pohjasedimenttiin. Minipietsometrin avulla voitiin myös vertailla pintaveden tason ja pohjaveden vertikaalihydraulisen korkeuden eroa ja sen kautta hydraulista gradienttia niiden välillä. Pohjavettä purkautuu pintaveteen niissä kohdissa, missä pohjavesi nousee minipietsometrissä pintaveden tasoa korkeammalle (Winter et al., 1988) (Kuva 9).



Kuva 9. Kun minipietsometrissä pohjavesi nousee letkussa korkeammalle kuin pintaveden pinta, sillä paikalla purkautuu pohjavettä. Kuva muokattu Rosenberry ja Labaughin (2008) kuvasta figure 12.

#### 4.6. Pohjavesinäytteenotto ja pinnakorkeusmittaukset

Pohjavesinäytteenoton tarkoituksena oli vertailla eri paikoista otettujen näytteiden ominaisuuksia ja niiden perusteella tarkastella pohjaveden kulkeutumisreittejä ja pintavesivaikutusta. Pohjavesinäytteitä kerättiin Hyrylän pohjavesialueen havaintoputkista ja minipietsometrin avulla Tuusulanjokeen purkautuvasta pohjavedestä. Pintavesi-pohjavesi vuorovaikutuksen tutkimista varten otettiin myös pintavesinäytteitä, jotta voitiin vertailla jakavatko pinta- ja pohjavesinäytteet samoja ominaisuuksia. Kun pohjaveden isotooppikoostumus vastaa pintaveden isotooppikoostumusta, voidaan päätellä, että pintavesi on ainakin kyseisellä näytteenottopaikalla sekoittunut pohjaveteen (Kivimäki et al. 2013).

Näytteenottoa varten saatiin Helsingin yliopiston laboratoriosta kolme erilaista näytteenottoastiaa. Suurin PEH-näytteenottopullo oli veden ionimääritystä varten, keskikokoinen isotoopeille ja pienin 10 ml koeputki hivenaine määrittystä varten (Kuva 10A). Hivenainemääritystä varten olevissa koeputkissa oli valmiina 50 µl typpihappoa ( $\text{HNO}_3$ ) vesinäytteen kestäväimiseksi. Pohjaveden havaintoputkien tarkat sijainnit löytyivät Ympäristöpalvelu Hertasta, jonka avulla voitiin suunnitella näytteenottopaikat kattamaan tutkimusalue riittävästi ja monipuolisesti.

Havaintoputkesta pumpattiin ensin pois kolminkertainen putken tilavuuden määrä vettä, jotta saatiin näytteitä varsinaisesta pohjavedestä, eikä putkessa seisoneesta vedestä. Vettä pumpatessa oli tärkeää tarkkailla pohjaveden pinnankorkeutta, ettei veden pinta ala laskea. Pumppuna käytettiin akulla toimivaa Super Twisteriä, jolla yletyttiin ottamaan näytteitä jopa 20 metrin syvyydeltä. Veden joitain ominaisuuksia kuten, lämpötila, hapen määrä, sähkönjohtavuus ja pH, voitiin tarkastella jo paikan päällä YSI-monimuuttujamittarilla (Kuva 10A). Täten näytteitä pystyttiin vertailemaan jo kentällä aistihavaintojen lisäksi.





Kuva 10. A: YSI-monimuuttujamittari ja erikokoisia näyteastioita. B: Pohjaveden pinnankorkeusmittari ja näytteenottoletku havaintoputkessa HP9704.

Pohjaveden pinnankorkeudet mitattiin havaintoputkista putken päästä dipper- T merkkisellä sähköisellä pohjaveden pinnan mittarilla (Kuva 10B). Ennen näytteenottoa näytteenottopullot huuhdeltiin näytevedellä ja ionikoostumus- näytteet pyrittiin ottamaan niin, että pulloon jäisi mahdollisimman vähän ilmaa. Hivenainenäytteitä suodatettiin 10 millilitraa pienen ruiskun avulla suodattimen läpi (0,45  $\mu\text{m}$  huokoskoon suodatin) koeputkiin. Näytteet nimettiin havaintoputken ja näytteenottotavan mukaan ja säilöttiin sekä kuljetettiin laboratorioon kylmälaukussa. Isotooppi- ja kiintoainenäytteet säilytettiin kylmiössä noin 2,5 kuukautta, kunnes ne syyskuussa analysoitiin laboratoriossa. Ioni-näytteet pakastettiin ja säilytettiin marraskuun analyysiin asti jäädytettynä noin viisi kuukautta.

Pohjaveden pinnankorkeusmittaukset ja pohjavesinäytteenotto suoritettiin 6. – 8.7.2020 välisellä ajalla Hyrylän alueen pohjavesiputkista ja minipietsometrin avulla Tuusulanjokeen purkautuvasta pohjavedestä. Pohjavesinäytteitä otettiin yhteensä 19 kappaletta, joiden lisäksi kerättiin pintavesinäytteitä (4kpl) eri kohdista Tuusulanjokea (Kuva 11). Pintavesinäytteet ovat Tuusulanjoen ylä- ja alajuoksulta, sekä Koskenmäen vedenottamon läheisyydestä ja sellaisesta kohdasta, jossa veteen purkautuu myös pohjavettä.



Kuva 11. Vesinäytteiden ottopaikat. Minipietsometrinäytteet ovat pintaveteen purkautuvasta pohjavedestä ja jokinäytteet pintavesistä. Pohjaveden havaintoputkista mitattiin myös pohjaveden pinnankorkeus.

#### 4.7. Vesianalyysit

Laboratoriossa vesianalyyseissä tutkittiin veden pääionikoostumusta, hapen ja vedyn stabiilit isotoopit ja veteen liuenneita hivenaineita. Vesianalyysit suoritettiin Helsingin yliopiston Geotieteiden ja maantieteen osaston ympäristölaboratoriossa syksyllä 2020 laboratoriohenkilökunnan avustuksella.

Hivenainekoostumukset analysoitiin kaikista näytteistä 31.8.2020. Näytteiden hivenainekoostumukset (Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Pb ja U) analysoitiin Agilent 7800 ICP-MS (plasmamassaspektrometria) laitteella, menetelmänä Water Quality (Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Part 2: Determination of selected elements including uranium isotopes (ISO 17294-2:2016)). Plasma-analytiikassa käytettävä plasma on osittain ionisoitunutta kuumaa kaasua tai höyryä, joka koostuu atomeista, molekyyleistä, varautuneista ioneista ja vapaista elektroneista (Virkanen et. al 2017). Plasmaan syötetty näyte hajoaa ja ionisoituu. ICP-MS mittaa ionisoituneiden aineiden spektriä ionin massa/varaus –suhteen ( $m/Z$ ) perusteella (Virkanen et. al 2017). Vertailunäytteinä käytettiin SPS-SW2 laimentamattomana ja 10-kertaa laimennettuna.

Näytteiden pääionikoostumus laboratoriossa mitattiin 12.11.2020. Pääionikoostumukset (Na, K, Ca, Mg, F, Cl,  $\text{NO}_3$ , ja  $\text{SO}_4$ ) näytteistä määritettiin Metrohm Eco IC laitteella. Ionikromatografia erottaa ja tunnistaa liuoksessa ionimuotoisina esiintyviä orgaanisia ja epäorgaanisia ioneja (Virkanen et. al 2017). Pääioni määrityksessä vertailunäytteinä käytettiin VKI QC DWB Major Components in Drinking Water ja Fluka Simple Nutrients - Whole Volume. Myös ionitasapainoa (IB%) tarkasteltiin näytteiden pääionikoostumuksen mukaan. Veden kationi- ja anionipitoisuuksien on oltava yhtä suuret, koska näyte on ulkoisesti sähköisesti neutraali (Virkanen 2020). Analytiikan taso on hyvä kun ionitasapaino on <3-(5)% (Virkanen 2020). Ionitasapaino lasketaan millitai mikroekvivalenteissa seuraavien kaavojen mukaan (Eaton et al. 1995):

$$\sum Kationit = [Ca] + [Mg] + [Na] + [K] + [pH] \quad (3)$$

$$\sum Anionit = Alkaliteetti + [SO_4] + [NO_3] + [Cl] \quad (4)$$

$$IB = 100\% \times \frac{\sum Kat - \sum An}{\sum Kat + \sum An} \quad (5)$$

Ionimittausten yhteydessä vesinäytteistä mitattiin myös pH ja alkaliteetti Titroline 5000 laitteella. Alkaliteettimittauksessa vertailunäytteenä käytettiin myös VKI QC DWB. Sähkönjohtavuus mitattiin Eco Scan con 6 conductivity meter laitteella ja siinä vertailunäytteenä käytettiin 0,001 M KCl. Sähkönjohtavuusmittaukset suoritettiin laboratoriossa 9.11.2020 ja pH mitattiin yhdessä alkaliteettimittausten kanssa 2.9.2020.

Näytteistä analysoitiin hapen ja vedyn stabiilit isotoopit laboratoriossa 24.9.2020 Picarro L1115-i laitteella. Tärkeitä isotooppeja ovat hapen ( $^{18}\text{O}$ ) ja vedyn ( $^2\text{H}$ ) isotoopit, sillä veden isotooppikoostumuksen muuttuminen kertoo hydrologisesta kiertokulusta (Clark ja Fritz, 1997). Vesianalyyseissä isotoppimäärät mitataan isotooppisuhteina, jossa raskasta isotooppia verrataan kevyempään. Merkintä " $\delta$ " tarkoittaa delta-arvoa ja on jonkin mitatun isotooppisuhteen määrää suhteessa standardiin (Clark ja Fritz, 1997) (Kaava 6).

$$^{18}\text{O} = \left[ \frac{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{näyte}}}{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{VSMOW}}} - 1 \right] * 1000 \quad (6)$$

Kaavassa 6 veden  $^{18}\text{O}$  isotooppi suhteet ilmaistaan suhteessa kansainväliseen referenssistandardiin (VSMOW = Vienna Standard Mean Ocean Water). Tulos kerrotaan tuhannella, jotta voidaan välttää pitkiä desimaalilukuja.

Sulamis- tai sadeveden sekoittuessa veteen, sen  $\delta^{18}\text{O}$ -arvo laskee, kun taas veden haihtuessa arvo kasvaa (Kivimäki et al. 2013). Haihtuminen ja sadeveden tiivistyminen muuttavat veden isotooppikoostumusta, minkä vuoksi pinta- ja pohjavesillä isotooppikoostumus on hyvin erilainen (Kivimäki et al. 2013). Veden

isotooppikoostumuksen perusteella voidaan tutkia pinta- ja pohjavesien välisten yhteyksien laatua. Vedyn ja hapen isotooppien välillä on lineaarinen korrelaatio, jota kuvaa globaalisten meteoristen vesien suora (GMWL = Global Meteoric Water Line) (Craig, 1961) (Kaava 7).

$$\delta^2H = 8 \times \delta^{18}O + 10 \text{ ‰} \quad (7)$$

GMWL kuvaa hapen ja vedyn isotooppiarvojen riippuvuutta sadannassa, missä  $\delta^2H$  on vedyn delta-arvo ja  $\delta^{18}O$  on hapen delta-arvo (Clark ja Fritz, 1997). Karhun (2001) mukaan matalien pohjavesien isotooppikoostumus Etelä-Suomessa seuraa lähes täysin globaalisten meteoristen vesien suoraa. LMWL on keksiarvo useista paikallisista meteoristen vesien suorista (LMWL = Local Meteoric Water Line). LMWL -suoriin vaikuttaa esimerkiksi paikalliset ilmasto-olosuhteet, sadannan kausivaihtelut ja sateen alkuperä (Clark ja Fritz, 1997).

Deuteriumin eli  $^2H$  isotoopin ylijäämä kertoo myös veden haihtuneisuudesta ja sen alkuperästä. D- ylijäämä arvo voidaan laskea  $\delta D$  ja  $\delta^{18}O$  -arvoista kaavan 5 mukaan (Dansgaard 1964). Haihtuneissa pintavesissä d-ylijäämä arvo on helposti alle 10‰, kun taas pohjavesissä arvo on noin  $10 \pm 1 \text{ ‰}$  (Kortelainen 2007).

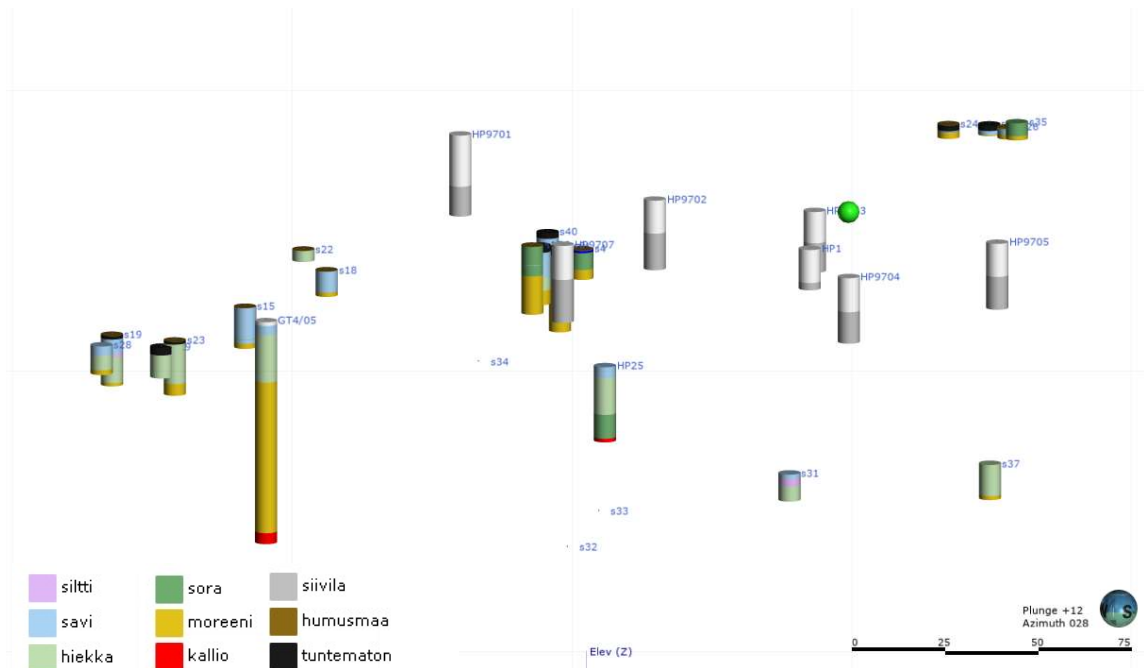
$$d = \delta D - 8 \times \delta^{18}O \text{ ‰ VSMOW} \quad (8)$$

missä d = deuteriumin ylijäämä,  $\delta D$  = deuteriumin delta-arvo ja  $\delta^{18}O$  =  $^{18}O$  isotoopin delta-arvo.

#### 4.8. 3D -hydrostratigrafisen rakennemallin luominen

Aikaisemman aineiston ja tätä tutkimusta varten kerätyn aineiston pohjalta tehtiin Hyrylän pohjavesialueesta hydrostratigrafinen 3D-malli. Mallinnukseen käytettiin Leapfrog Geo 5.1.2 (Seequent Ltd.) -ohjelmistoa. 3D-mallin avulla voidaan hahmotella esimerkiksi kallionpinnan syvyyttä sekä maaperän kerroksia pohjavesialueella. 3D-malli antaa yleisen käsityksen alueen topografiasta, maaperästä, kallionpinnan korkeudesta sekä akviferin koosta, riippuen saatavilla olevan datan tarkkuudesta ja määrästä.

Mallin työstäminen aloitettiin tekemällä kairaus- ja havaintoputkitiedoista yhtenäiset CSV (comma-separated values) tiedostot, joiden tuli sisältää havaintopisteiden koordinaatit (x, y ja z), mahdolliset maalajitiedot eri syvyyksillä sekä havaintoputkien syvyys ja kaade. Tuusulan kunnalta saaduissa painokairauksissa oli havaittu maalajeiksi moreeni, sora, hiekka savi ja siltti (Kuva 12). Myös osassa Hyrylän alueen pohjavesiputkien putkikorteista oli putken asentamisen yhteydessä tehtyjä maalajihavaintoja, joita hyödynnettiin maalajitietojen keräyksessä. Kairaustietojen perusteella jokaiselle maalajille luotiin Leapfrogissa mesh- tasot (engl. contact surfaces), jotka laskettiin kairauksien maalajihavaintojen syvyyksien perusteella ja joiden tehtävä oli määrittää 3D-maalajiyksiköiden rajapinnat. Kallionpinnan tietoja oli kairauksissa hyvin vähän, joten kallionpinta hahmoteltiin Leapfrogiin GTK:n rakenneselvityksessä tehtyjen painovoimamittausten perusteella (Breilin et al. 2005). Painovoimalinjojen sijainti kartalla tarkistettiin paikkatieto-ohjelma QGIS:lla, jonka avulla painovoimalinjoille saatiin linjan alkua ja loppupään koordinaatit. Tarkastettujen koordinaattien avulla voitiin painovoimalinjat tuoda kuvina Leapfrogiin, jossa kuvissa tulkitut kallionpinnat piirrettiin manuaalisesti 2D-murtoviivoina (engl. 2D polylines). Manuaalisesti piirrettyjen painovoimalinjojen sekä putkikorttien kalliovarmenteiden avulla tehtiin mesh -taso kallionpinnalle. Painovoimalinjojen avulla piirretty kallionpinta vastasi kalliovarmenteiden pohjavesiputkien putkikorttien tietoja, joten sen voitiin olettaa olevan realistinen.



Kuva 12. Painokairaukset ja pohjavesiputket tuotuna Leapfrogiin. Vihreä pallo kuvaa Koskenmäen vedenottamon sijaintia. Pohjavesiputkista, joissa ei ole maalajitietoja, on merkitty harmaalla siivilän osuus. GT4/5 ja HP25 putkikortit sisälsivät myös tietoa maalajeista sekä kalliovarmenteen. Kuvassa näkyvien maalajiyksiköiden perusteella Leapfrog luo jokaiselle maalajiyksikölle mesh -tason.

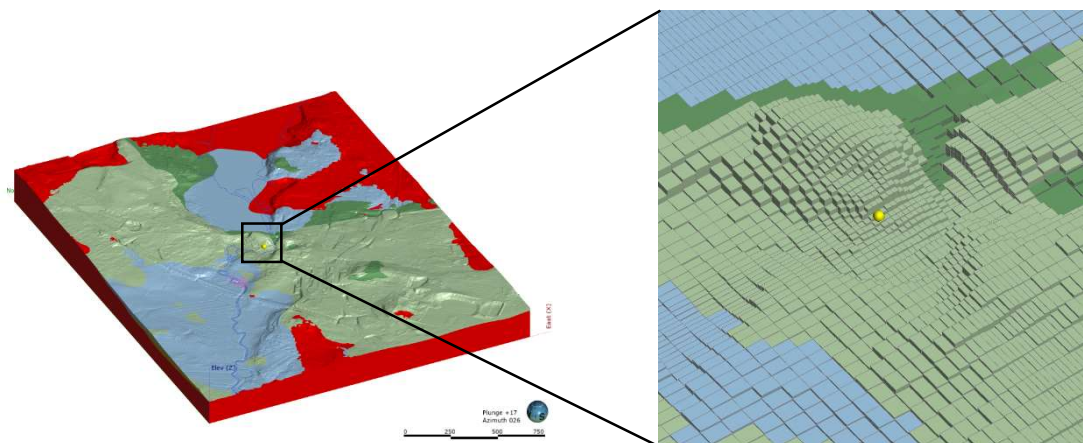
Seuraavaksi luotiin Leapfrogiin geologinen 3D-malli Hyrylän pohjavesialueesta, joka rajattiin perustuen Hyrylän A pohjavesialueeseen. Geologisen mallin resoluutioksi asetettiin 100 metriä. Geologiseen malliin tuotiin kallionpinnan ja maalajien mesh -tasot, jotka asennettiin kronologiseen järjestykseen niin, että kallio on alin yksikkö, jonka päälle maalajikerrokset ovat kasaantuneet järjestyksessä moreeni, sora, hiekka, siltti ja savi. Maalajien mesh -tasot tehtiin Deposit- tyypillä ja kallionpinta tehtiin Erosion- tyypillä. Kronologisen järjestyksen määrittäminen on tärkeää, jotta Leapfrog osaa laskea kerrosten leikkaussuhteet, joihin myös mesh -tason tyyppi vaikuttaa, toisiinsa nähden oikein (Åberg et al. 2021 Fig 13 ja Leapfrog Help). Tämän jälkeen Leapfrog laski mesh -tasoista geologiset 3D- yksiköt jokaiselle maalajille. Koska maalajien kairaustiedot sijoittuvat vain Koskenmäen alueelle, keskelle geologista mallia, saattavat Leapfrogin laskemat mesh -tasot poiketa syvyydeltään todellisuudesta mallin reunoilla, joilla ei ole kairaustietoa saatavilla. Malliin piirrettiin manuaalisesti 2D-apumurtoviivoja auttamaan mesh -tasojen laskemista myös mallin reunoilla. Maalajiyksiköiden muokkaamisessa hyödynnettiin GTK:n pintamaalaji -karttaa, johon Leapfrogin luomaa 3D-mallin pinnan maaperäjakaumaa voitiin vertailla. Geologisen 3D-mallin topografiana käytettiin



Maanmittauslaitoksen kahden metrin resoluution LIDAR- korkeusmallia. Heinäkuussa mitatut pohjaveden pinnankorkeustiedot tuotiin malliin pisteinä, joiden perusteella Leapfrog -ohjelmalla tehtiin pohjaveden pintaa vastaava mesh -taso.

Maatutkaluotausprofiileja on myös mahdollista tuoda tarkasteltavaksi Leapfrogiin, jolloin voidaan piirtää manuaalisesti murtoviivoja hahmottamaan maatutkakuvista tulkittuja kerroksia, pohjavedenpinnan tasoa tai kallionpintaa. Maatutkaluotausprofiilien sijaintitieto on pistemäisessä muodossa, joten profiilit vietiin QGIS -ohjelmaan, jossa pistemäinen data muokattiin geospaatialiseen vektorimuotoon. Vektorimuotoinen shapefile -tiedosto vietiin Leapfrogiin 2D-poikkileikkauskuvina, jotka yhdistettiin niitä vastaaviin maatutkalinjoihin.

Viimeiseksi Hyrylän hydrostratigrafisesta 3D- mallista tehtiin Leapfrogin Hydrogeology-työkalulla hilaverkko-tiedosto pohjaveden virtausmallinnusta varten. Hilaverkko -muotoisessa 3D-mallissa, jokaiselle solulle voi antaa eri hydraulisen johtavuuden arvon. Solut ovat suorakulmaisia särmiöitä, joille voidaan Leapfrogissa määrätä manuaalisesti särmän pituus x, y ja z suunnassa. Tässä mallissa hilaverkko muokattiin niin, että solukoko pienenee kaivon ympäristössä tasaisesti noin kahden metrin välein. Mallille määrättiin yleiseksi horisontaaliseksi solukooksi 20 kertaa 20 metriä ja pienimmillään Koskenmäen kaivon ympärillä se on 5 kertaa 5 metriä (Kuva 13). Mitä pienempi solukoko on, sen tarkemmaksi saadaan laskettua pohjaveden pinnan alenema kaivon ympärillä (Leapfrog Help).



Kuva 13. Hilaverkon solukoko pienenee lähellä Koskenmäen kaivoa (keltainen piste).



#### 4.9. Pohjaveden virtausmallin luominen ModelMuse -ohjelmalla

Yksi tämän tutkimuksen tavoitteista oli selvittää mistä vesi Koskenmäen vedenottamolle kulkeutuu. Virtausmalli kuvaa nesteen virtausta huokoisessa väliaineessa, kuten maaperässä tai ruhjeisessa kallioperässä (Seppälä ja Tuominen 2005). Pohjaveden virtausmallin avulla voidaan tarkastella pohjaveden virtauksen suunnan ja pinnan tason lisäksi myös esimerkiksi määritellyn kaivon sieppausaluetta. Virtausmalli tehtiin ModelMuse avoin lähdekoodi ohjelmalla versiolla ModelMuse 4.

Virtausmallinnus ModelMusessa perustuu Darcyn lakiin (v. 1856) (Kaava 9), joka voidaan esittää seuraavasti:

$$Q = KA \left( \frac{dh}{dl} \right) \quad (9)$$

missä  $Q$  = virtausnopeus ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ),  $K$  = vedenjohtavuus ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $A$  = solun poikkipinta-ala ( $\text{m}^2$ ),  $h$  = solun korkeus (m) ja  $l$  = solun pituus (m)

ModelMuse käyttää laskemisessa differenssimenetelmää, missä pohjavesialue jaetaan säännölliseen hilapisteverkkoon. Tässä mallissa käytettiin differenssimenetelmään perustuvaa MODFLOW-NWT (Newton-Raphson formulation) virtausmallinnuskoodia. MODFLOW-NWT valittiin tähän malliin, koska se sopii paremmin vapaan akviferin mallintamiseen, jossa maaperäyksiköt ovat hajanaisia. MODFLOW-NWT laskee kuiville soluille pohjaveden pinnan, jolloin se mahdollistaa vedenpinnan vaihtelun kerrosten läpi laskennan aikana (Niswonger et al. 2011). MODPATH-partikkelikulkeutumismallin (Pollock 1994) avulla mallinnetaan partikkelin kulkeutumista pohjavedessä, joten sitä käytettiin Koskenmäen kaivon sieppausalueen määrittämiseen. Molemmat koodit MODFLOW ja MODPATH ovat saatavilla USGS:n (United States Geological Survey) verkkosivuilta.

#### 4.9.1. Mallin laatiminen

Mallin laatiminen aloitetaan määrittämällä pohjavesialueelle rajat, topografia ja maaperän kerrosrakenteet (Seppälä ja Tuominen 2005). Virtausmallin hilaruudukko luotiin jo aikaisemmassa vaiheessa Leapfrog- ohjelmistolla (Kappale 4.6.). Myös mallinnusalueen rajat, topografia ja kerrospaksuus määriteltiin Leapfrogissa, joten virtausmallinnus voitiin aloittaa valmiiksi rajatusta hilaruudukosta. Seuraavaksi mallille syötettiin lähtötietoja, jotka kerättiin avoimista aineistopalveluista sekä kenttämittauksin. Tähän malliin syötetyt lähtötiedot listana:

- kallionpinnan korkeus (Leapfrog Geo)
- maanpinnan topografia (Leapfrog Geo)
- maaperä kerrokset (Leapfrog Geo)
- vedenjohtavuusarvot maalajien parametrisyksiköille
- kallion murroslaakso
- havaintoputket (sijainti ja mitatut pohjaveden pinnat)
- pohjaveden muodostumisalue
- pohjaveden muodostumisen määrä
- pintavesistöt (Tuusulanjoki ja -järvi)
- vedenottamo

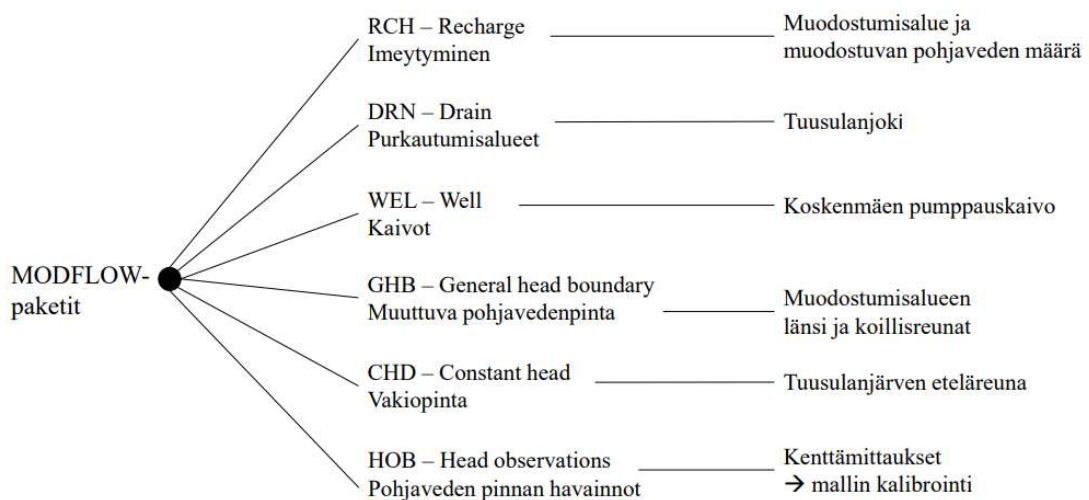
Horisontaalisen vedenjohtavuuden parametrivähykkeitä eli maaperän kerroksia virtausmallissa ovat kallio, moreeni, sora, hiekka, savi ja siltti. Maaperän kerrokset oletettiin horisontaalisiksi, joten niille voitiin yksinkertaistukseksi määrittää vertikaalinen anisotrooppisuus (VANI) arvolla 10 (Åberg et al. 2021). Kalliolle määritettiin vertikaaliseksi anisotrooppisuudeksi arvo 1. Maaperän vedenjohtavuudet eri maalajien parametrisyksiköille määritettiin pääosin maalajien perusteella Freeze ja Cherry (1979) Taulukon 2.2 mukaan. Koillis-lounaissaunaiseen murroslaaksoon määritettiin suurempi vedenjohtavuus kuin muuhun kallioon, sillä kallion rikkonaisuuden oletettiin suurentavan vedenjohtavuutta. Havaintoputkitiedot ja kesällä 2020 kenttätöiden yhteydessä mitatut pohjaveden pinnat käytettiin mallin kalibrointia varten. Soralle ja hiekalle laskettiin suuntaa antavat johtavuusarvot Hazenin menetelmällä Tuusulan kunnan painokairauksen yhteydessä tuotetuista rakeisuuskäyristä. Hazenin kaava määrittelee vedenjohtavuuden

raekoon mukaan, joka osuu raejakauman käyrässä 10% läpäisevyyden kohdalle (Hazen 1911):

$$k_w = C_H \cdot (D_{10})^2 \quad (10)$$

missä  $k_w$  = vedenjohtavuus,  $C_H$  = vakio joka vaihtelee maalajin mukaa ja  $D_{10}$  = raekoko, joka vastaa 10% läpäisyä (cm).

MODFLOW:ssa on erilaisia reunaehtomallinnuspaketteja, joiden parametrien arvoja voidaan muokata mallinnuksen aikana (Kuva 14). Yksi paketeista on pohjaveden muodostuminen (Recharge), jossa määritellään pohjaveden muodostumisalueiden sijainnit ja muodostuvan pohjaveden määrää. Pohjaveden muodostumisalue piirrettiin malliin manuaalisesti SYKEN avoin tieto aineiston pohjalta. Pohjaveden muodostumisen määrä laskettiin yksinkertaisesti arvioimalla prosentuaalisesti, kuinka paljon alueen sadannasta imeytyy akviferiin. Vuoden yhteenlaskettu sadanta lähimmällä mittauspisteellä Helsinki-Vantaan lentokentällä oli 939.2 mm/a (Ilmatieteen laitos, kesäkuu 2019 – kesäkuu 2020). Koska Hyrylän pohjavesialue on suurilta osin päällystettyä ja rakennettua, arvioitiin imeytymisprosentiksi 30%, jolloin päivittäiseksi imeytymiseksi saatiin  $0.0077 \text{ m d}^{-1}$ .



Kuva 14. Virtausmallinnuksen MODFLOW- koodin paketit.

Tuusulanjoki määriteltiin virtausmallissa ojitus (Drain) pakettiin, koska siellä on todettu pohjaveden purkautuvan jokeen. Ojitus- paketti tarvitsee myös vedenjohtavuusarvot, joiden mukaan se laskee kuinka paljon pohjavettä voi jokaisesta solusta purkautua jokeen. Vedenjohtavuus määritetään Conductance-muuttujan mukaan (Harbaugh 2005). Conductance- muuttujan arvot joen pohjalle määriteltiin samoiksi kuin siinä kohtaa vallitseva maaperän vedenjohtavuusarvo kerrottuna solun pinta-alalla, jolloin yksikkö oli  $\text{m}^2 \text{d}^{-1}$  (Harbaugh 2005). Koskenmäen kaivo määriteltiin kaivo (Well) paketissa, missä kaivon ottomäärät merkitään negatiivisina ja yksikössä  $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ . Kaivon oletus pumppausmääräksi virtausmalliin asetettiin todellisen pumppausmäärän karkea keskiarvo eli  $1000 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ .

Seuraavaksi mallin ulkorajoille asennettiin reunaehdot (Boundary condition), jotka sallivat veden virtauksen mallin määrättyjen rajojen ulkopuolelta. Koska muodostumisalue sijoittuu osin mallin ulkoreunoille, piti näille kohdille määrittää reunaehdot, jotka perustuivat pohjaveden korkeudesta riippuvaan virtaukseen. Reunaehdot voitiin määritellä GHB (General Head Boundary) paketin avulla. GHB-soluissa pohjaveden pinta voi vaihdella laskennan aikana, kun taas vakiovedenpinnaksi (Constant head) määritellyissä soluissa vedenpinta pysy koko ajan vakiona (Seppälä ja Tuominen 2005). Vakiovedenpinta asennettiin Tuusulanjärven eteläreunaan pohjaveden muodostumisalueen rajalle, sillä siellä voidaan olettaa tapahtuvan rantaimetyymistä tai vettä purkautuvan myös järveen. Kesällä 2020 mitatut pohjaveden pinnankorkeudet tuotiin virtausmalliin mallin kalibrointia varten. Pohjaveden pinnan havainnot -paketissa (Head observations), voidaan vertailla havaittuja ja mallin laskemia pohjaveden pinnankorkeuden arvoja toisiinsa ja käyttää mallin kalibroinnin apuvälineenä.

#### *4.9.2. Mallin kalibrointi ja ennustejot*

Virtausmalli tuli kalibroida vastaamaan Hyrylän pohjavesialueen oikeita fyysisiä ominaisuuksia. Kalibroinnissa verrattiin mallin laskemia tuloksia kenttämittauksiin ja muihin aikaisempiin havaintoihin (Seppälä ja Tuominen 2005). Kesällä 2020 kenttätöissä mitatut pohjaveden pinnat syötettiin malliin pistemuotoisina pohjaveden pinnankorkeus havaintoina. Jokaiselle putkelle määrättiin syvyydeksi putkikortissa mainitun siivilän puoliväli. Aikaisempaa tietoa Hyrylän pohjavesialueelta oli pohjaveden virtaussuunnista, joita voitiin myös kalibroinnin aikana vertailla tuloksiin.

Kalibroinnin aikana virtausmallin parametreja muunnellaan, kunnes lasketut tulokset vastaavat havaittuja arvoja (Seppälä ja Tuominen 2005). Tämän tutkimuksen osalta kalibrointi painottui vedenjohtavuusarvojen muunteluun. Myös pohjaveden muodostumismäärää ja aluetta sekä murroslaakson koon muuttamista käytettiin mallin kalibroimisen apuna. Parametrien muuttamisen jälkeen malli ajettiin uudestaan ja tulosten perusteella tehtiin tarvittavia lisämuutoksia kohti parhaita kalibrointituloksia. MODFLOW-NWT ei kuitenkaan pysty laskemaan mallia loppuun, jos esimerkiksi vedenjohtavuusarvojen suuruusvaihtelu eri kerroksissa on liian suuri. Myös liian pieni pohjaveden muodostumisen määrä voi johtaa kaivon kuivumiseen, eikä malli tällöin toimi.

Taulukko 5. Lopullisen toimivan pohjaveden virtausmallin vedenjohtavuusarvot

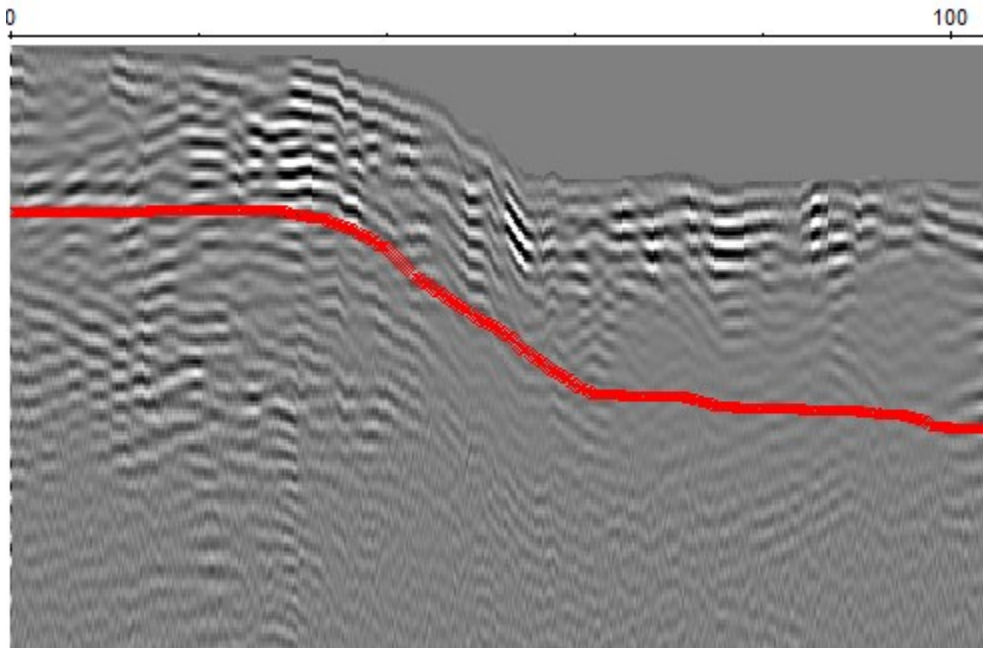
Maalaji yksikkö	Vedenjohtavuus (m s <sup>-1</sup> )	Vedenjohtavuus (m d <sup>-1</sup> )	Raekokoanalyysiin perustuva tulos (m d <sup>-1</sup> )
Savi ja siltti	1 x 10 <sup>-6</sup>	0.0864	-
Kallio	1 x 10 <sup>-5</sup>	0.864	-
Moreeni	5,8 x 10 <sup>-5</sup>	5	-
Murroslaakso	1,1 x 10 <sup>-3</sup>	100	-
Hiekka	4,6 x 10 <sup>-3</sup>	400	473
Sora	5,3 x 10 <sup>-2</sup>	4600	5400

## 5. TULOKSET

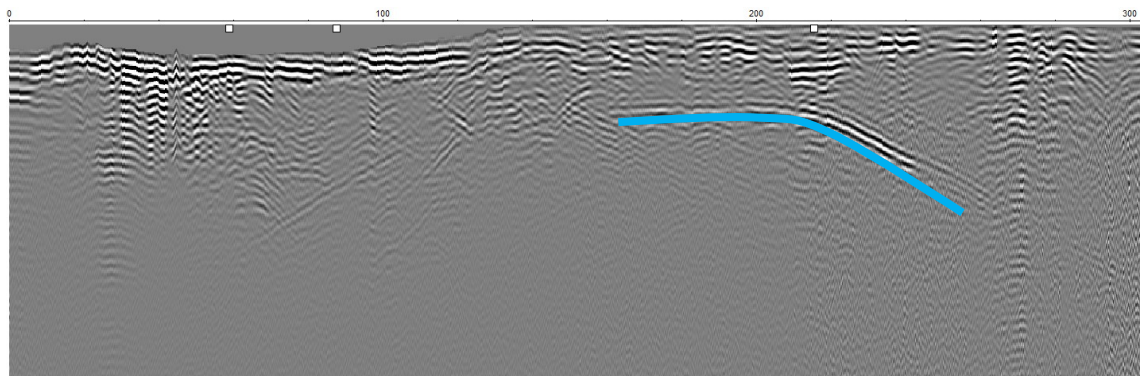
### 5.1. Maatutkaluotaus

Maatutkaprofiilit olivat suurimmalta osin epäselviä, joten kallion- ja pohjaveden pintoja oli vaikea havaita maatutkaprofiilikuvista. Maatutkaluotaus suoritettiin päivä aikaan, joten luotaussignaaleja häiritsevää liikennettä oli paljon. Koska Hyrylän taajama on tiheästi rakennettua ja päällystettyä, piti linjat vetää suurimmalta osin asfaltin päällä. Tien päällysteet vaimensivat sähköpulsseja, joten luotausprofiilien havainnot jäivät vajaiksi. Myös alueella hiekkakerrosten välissä sijaitsevat savi- ja silttikerrokset vaimensivat paikoin sähköpulsseja.

Profiilien käsittely ReflexW ohjelmalla auttoi profiilien tulkitsemisessa, joten osasta profiileista pystyttiin hahmottamaan pohjaveden tai kallion pintoja. Linjoilla 0014 ja 0015 pystytään hahmottamaan pohjaveden pinta (Kuva 15), mutta 0020 oli ainoa linja, jolla voitiin havaita selvästi kallionpinta (Kuva 16). Linjat 0014 ja 0015 vedettiin päällystämättömällä metsäpolulla, joten niihin aiheutui vähiten häiriötä. Linjalla 0020 kallionpinta on hyvin lähellä maanpintaa, joten sähköpulssit ylettyivät kallionpintaan asti ja pieni osa kalliota onkin nähtävissä luotausprofiilikuvasta. Muita tutkimuslinjoja oli vaikea tulkita. Häiriötä niihin aiheuttivat liikenteen ja teiden päällysteiden lisäksi maaperän hienoaainessedimentit, jotka vaimensivat signaalin kulun. Kallionpinta oli myös paikoin niin syvällä, etteivät luotauspulssit ylettäneet kallionpintaan asti.



Kuva 15. Linja 0015. Punaisella viivalla on merkitty havaittu pohjaveden pinta. Kuvan vasemmassa reunassa pohjaveden pinta on noin 9 metriä maanpinnasta. Linja on vedetty pohjoisesta etelään ja mittakaava kuvan yläpuolella on mitattu metreissä.



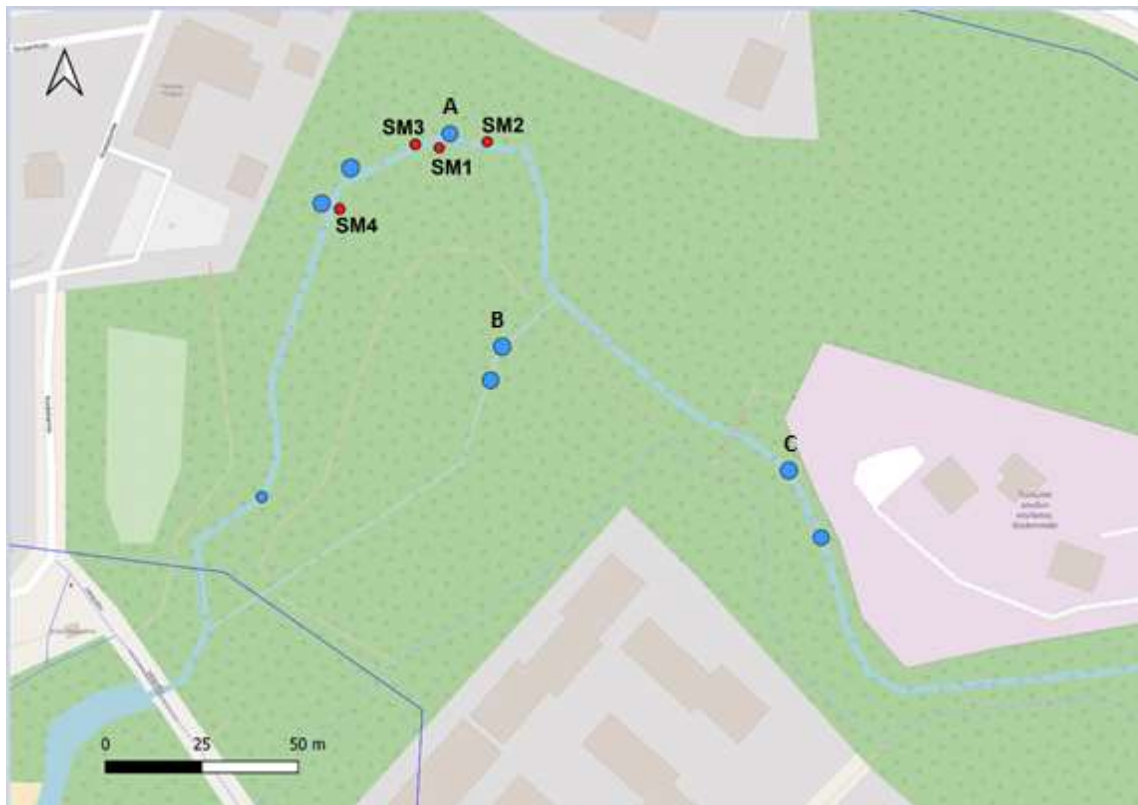
Kuva 16. Linja 0020. Sinisellä viivalla on merkitty havaittu kallionpinta. Linja kulkee kalliovarmenteisen pohjavesiputken (HP02/00) vierestä, jonka avulla profiilista tulkittu kallionpinta voitiin varmistaa oikeaksi. Linja on vedetty etelästä pohjoiseen ja mittakaava kuvan yläpuolella on mitattu metreissä.



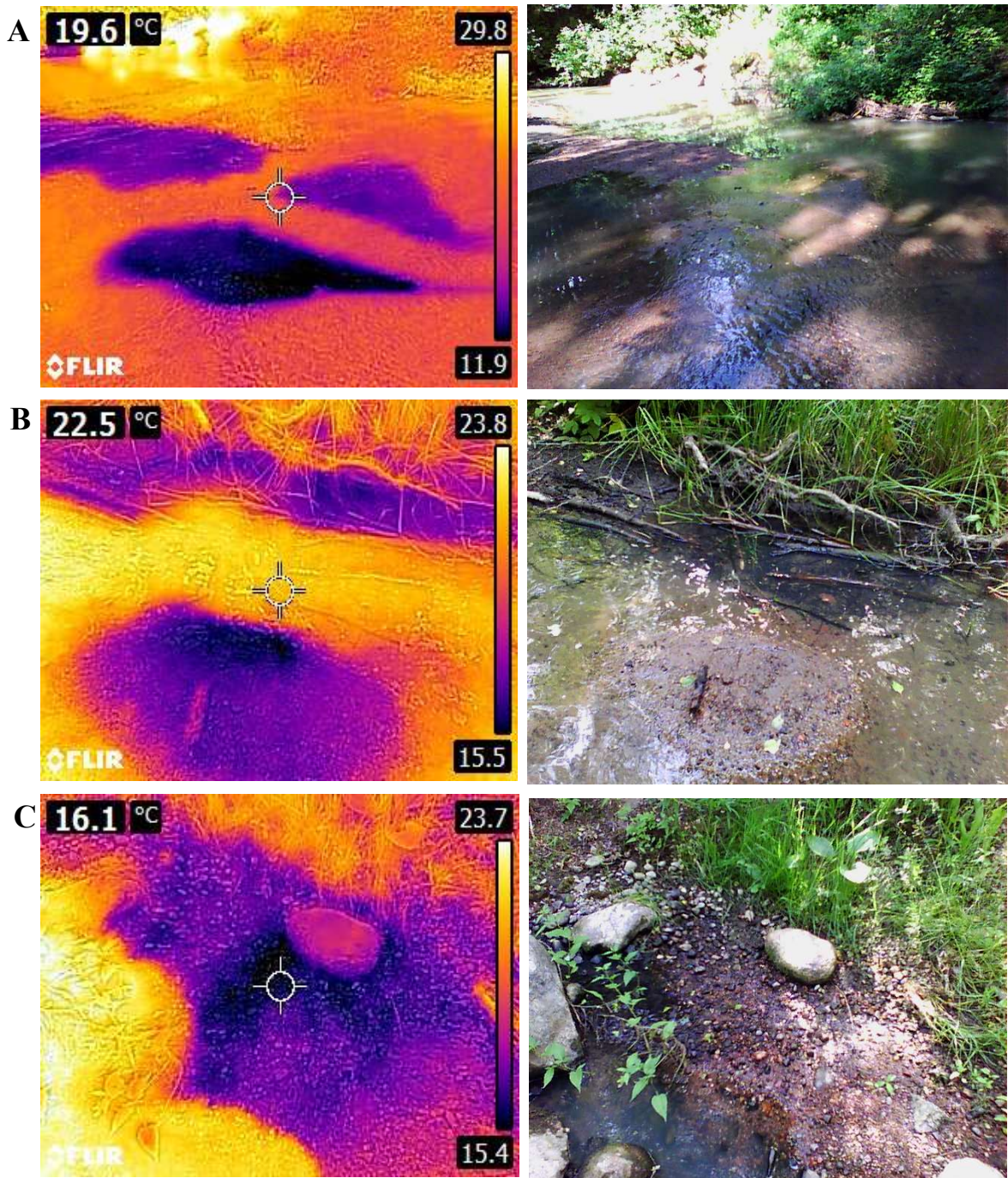
## 5.2. Termiset menetelmät

### 5.2.1. Käsikäyttöinen lämpötilakamera

Pintaveden lämpötilamittausta tehtiin Koskenmäen vedenottamon läheisellä jokiosuudella vedenottamolta sillalle, joka näkyy Kuvan 17 kartalla lounaassa. Tutkitulta jokipätkältä selviä pohjaveden purkautumiskohtia löytyi kahdeksan. Suurin osa havaituista purkaukskohdista oli aivan joen reunoilla, mutta kohdassa A pohjavedenpurkaukset näkyivät lämpötilakamerassa suurina alueina keskellä uomaa (Kuva 18A). Joen pinta oli niin matalalla, että osa purkaukskohdista oli myös nähtävissä paljain silmin kohdissa, joissa pintavesi ei peittänyt pohjasedimenttiä (Kuva 18C). Pohjaveden purkausalueet olivat jo kaukaa helposti havaittavissa kameran infrapunalinssin läpi. Jo termisten mittausten yhteydessä havaittiin Tuusulanjoen pohjasedimentin olevan kaikkialla lämpötilamittauspaikoissa hyvin vettäjohtavaa karkeaa hiekkaa tai soraa.



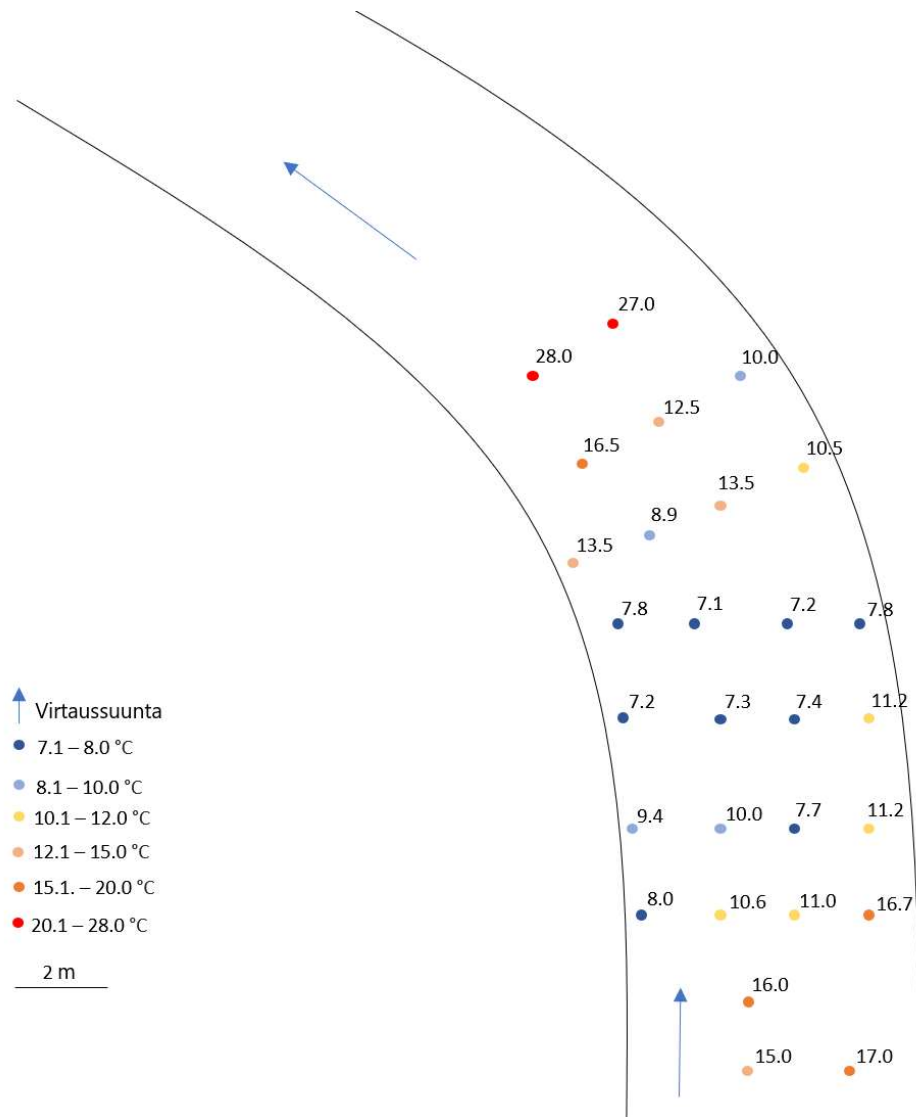
Kuva 17. Pohjaveden purkautumiskohtia Tuusulanjoella. Siniset pisteet kuvaavat käsikäyttöisellä lämpökameralla löydettyjä purkaukskohtia ja punaiset pisteet ovat suotovirtaamamittauksien mittauspaikat. Pohjasedimentin lämpötilaprofiili on tehty SM3 – SM2 väliseltä jokipätkältä.



Kuva 18. Esimerkkejä lämpökameralla tutkimuspäivänä otetuista kuvista, joista voidaan nähdä pohjaveden purkautuvan Tuusulanjokeen. Vierekkäiset kuvat ovat sama kuva, mutta eri linssillä otettuina. Infrapunakuvissa näkyy vasemmassa yläreunassa osoittimen kohdalla oleva lämpötila sekä oikeassa reunassa kuvan alueen minimi ja maksimi lämpötilat. Tummat alueet ovat pohjaveden purkauskohtia, jotka ovat myös myöhemmin varmistettu sedimenttilämpötilamittarilla.

### 5.2.2. Sedimenttilämpötilamittari

Pintaveden keskilämpötila mittauspäivänä oli 25 °C. Mittausalueen keskellä pohjasedimentin lämpötila oli huomattavasti alempi kuin pintaveden lämpötila (Kuva 19). Pohjasedimentin lämpötilaprofiili on tehty tarkentamaan pohjaveden purkautumiskohtia lämpökamerahavainnoista kohdassa A. Pohjavettä purkautui lämpötilaerojen perusteella joen pohjasedimentin läpi ainakin keskellä mittausaluetta pisteissä, joissa lämpötila oli 7,1 – 8 °C. Joen pohjasedimentti oli koko mittausalueelta karkeaa hiekkaa tai soraa.



Kuva 19. Lämpötilamittauspisteet Tuusulanjoella. Mittauspisteiden arvot ovat celsius asteina. Keskimmäisten mittauspisteiden lämpötilat ovat selvästi muita alempia ja vastaavat myös alueen pohjaveden yleistä lämpötilaa.

### 5.3. Suotovirtaamamittaukset

Nopein suotauman virtaama mitattiin suotovirtaamamittarissa 1, jossa keskimääräiseksi suotauman virtaamaksi saatiin  $2,9 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ . Suotovirtaamamittareissa 3 ja 4 virtaamaksi mitattiin  $2,1 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ . Hitain virtaama oli mittarilla 2, jossa keskimääräiseksi virtaamaksi saatiin  $1,9 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

Taulukko 6. Suotovirtaamamittausten tulokset. Suotauman virtaama Q on laskettu Kaavan 2 mukaan.

	Aika (s)	Suotauma (ml)	Mittarin pinta-ala (cm <sup>2</sup> )	Suotauman virtaama Q (m s <sup>-1</sup> )
SM1			2551,8	
1	240	2000		$2,9 \times 10^{-5}$
2	240	2000		$2,9 \times 10^{-5}$
3	240	2000		$2,9 \times 10^{-5}$
<b>keskiarvo</b>	<b>240</b>	<b>2000</b>		<b><math>2,9 \times 10^{-5}</math></b>
SM2			2551,8	
1	240	1300		$1,8 \times 10^{-5}$
2	240	1300		$1,8 \times 10^{-5}$
3	240	1400		$2,0 \times 10^{-5}$
<b>keskiarvo</b>	<b>240</b>	<b>1333,3</b>		<b><math>1,9 \times 10^{-5}</math></b>
SM3			2642,1	
1	240	1550		$2,1 \times 10^{-5}$
2	240	1590		$2,2 \times 10^{-5}$
3	240	1500		$2,1 \times 10^{-5}$
<b>keskiarvo</b>	<b>240</b>	<b>1546,7</b>		<b><math>2,1 \times 10^{-5}</math></b>
SM4			2551,8	
1	240	1500		$2,1 \times 10^{-5}$
2	240	1500		$2,1 \times 10^{-5}$
3	240	1400		$2,0 \times 10^{-5}$
<b>keskiarvo</b>	<b>240</b>	<b>1466,7</b>		<b><math>2,1 \times 10^{-5}</math></b>



## 5.4. Pohjavesinäytteenotto ja pinnankorkeusmittaukset

Vesinäytteenoton tarkoituksena oli selvittää pohjaveden isotooppi-, pääioni- ja hivenainekoostumusta tutkimusalueella ja vertailla vesinäytteitä eri puolilta tutkimusaluetta. Tulokset -osiossa ei syvennyt yksityiskohtaisesti jokaisen näytteen yksittäisiin pitoisuuksiin, vaan tarkoituksena on nostaa esille poikkeavuuksia ja ääripäitä. Pohjaveden pinnankorkeudet ja kenttämittaukset ovat esitetty omassa kappaleessa erillään laboratoriotuloksista.

### 5.4.1. Kenttämittaukset ja havainnot

Kenttätöissä kesällä 2020 pohjavesinäytteenoton yhteydessä mitattiin pohjaveden pinnankorkeuksia sekä pohjaveden lämpötilaa, happipitoisuutta, sähkönjohtavuutta ja pH. Näytteenotto ei onnistunut pohjavesiputkesta HP27/00, sillä näytteenottopumpun teho ei riittänyt pumppaamaan vettä niin pitkstä putkesta. Havaintoputkessa HP27/00 pohjaveden pinta oli 22 metriä putken päästä. Havaintoputki HP1 oli vanha ja huonossa kunnossa, joten siitä mitattu pohjaveden pinnankorkeus on epävarma. Putki HP10/99 oli ruosteessa ja tukkoinen, joten sen mittaustuloksiin kannattaa suhtautua varauksella. Joki2 mittauspisteestä otettiin näyte vain laboratorioanalyysjä varten. Pohjaveden pinnankorkeus vaihteli välillä +36,36...+52,1 mpy (N2000). Matalimmillaan pohjaveden pinnankorkeus oli havaintoputkessa HP9703 ja korkeimmillaan havaintoputkessa HP53.

Lämpötilaltaan pohjavesi vaihteli välillä 7...9,2 °C, lukuunottamatta kahta poikkeusta (HP10/99 ja HP32/00), joissa lämpötila nousi yli 10 °C. Pohjaveden happipitoisuus vaihteli paljon eri havaintoputkissa. Pohjavesi oli erityisen hapetonta havaintoputkessa HP9701 ja vähähappista havaintoputkissa HP9702 ja HP02/00. Sähkönjohtavuudeltaan, muista mittauspisteistä poikkesi havaintoputki HP02/00, jossa sähkönjohtavuudeksi mitattiin kentällä 519,9  $\mu\text{S cm}^{-1}$  ja laboratoriossa 481,0  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Pohjaveden pH kenttämittauksissa vaihteli välillä 5,6...7,1 lukuunottamatta havaintoputkea HP9702, jonka veden pH oli 3,2. Laboratoriomittauksissa havaintoputken HP9702 vesinäytteen pH oli 7,2. Kaikkien näytteiden pH on talousvesien laatuvaatimusten mukaista (pH 6,5-9,5) (STM 1352/2015).

Pintavedet olivat kentällä mitatuilta ominaisuuksiltaan kaikki hyvin samankaltaisia. Pintavedet olivat hapekkaita ja sähkönjohtavuus vaihteli välillä 139...142.2  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . Pintavesien keskilämpötila oli 18.5 °C. Pintavedet erosivat pohjavesistä pienemmillä sähkönjohtavuusarvoilla.

Taulukko 7. Mitatut pohjaveden pinnankorkeudet metreinä merenpinnasta ja näytteenottohetkellä YSI-mittarilla mitatut veden ominaisuudet sekä laboratoriossa mitatut sähkönjohtavuus ja pH arvot.

Näyte	Vesipinta (mpy)	Lämpötila °C	Happi %	EC $\mu\text{S cm}^{-1}$	EC lab $\mu\text{S cm}^{-1}$	pH	pH lab
HP9701	36,47	7,1	3	347,6	324,0	6,3	7,3
HP9702	36,74	7,4	29	324,2	320,0	3,2	7,2
HP9703	36,36	8,2	85	252,8	253,0	6,2	6,7
HP9704	36,6	8,1	92	250,9	251,0	6,2	6,8
HP9705	37,08	7,9	69	246,9	245,0	6,1	6,8
HP9707	36,44	8,3	91	265,9	264,0	6,2	6,9
HP1	34,13	8,6	84	257,4	256,0	6,2	6,7
HP01/00	37,3	8,6	101	373,5	373,0	6,2	6,8
HP02/00	48,47	9,2	43	519,9	481,0	5,6	6,7
HP32/00	42,32	10,1	98	152,2	153,0	6,4	6,9
HP27/00	37,34				191,0		7,2
HP53	52,71	7,6	92	193,4	279,0	6,3	7,1
HP25	36,72	8,5	82	274,9	291,0	6,2	7,0
GT4/05	36,57	8,1	81	287,7	522,0	6,1	6,7
HP10/99	38,22	10,5	25	710,0	606,0	6,1	6,9
MP1				307,6	284,0	7,0	7,0
MP2				286,8	354,0	7,0	6,9
MP3				365,8	280,0	7,1	7,1
MP4				158,0	257,0	6,4	7,4
MP5				263,4	142,0	6,8	8,7
Joki1		18,9	88	139,0	145,0	7,1	7,8
Joki3		18,4	89	138,7	138,0	7,3	7,4
Joki4		18,2	91	142,2		7,2	

Sähkönjohtavuusmittaukset laboratoriossa vastasivat melko hyvin kentällä mitattuja sähkönjohtavuusarvoja. Laboratoriossa mitatut pH arvot olivat kaikissa näytteissä hieman korkeampia kuin kenttämittauksissa. pH muuntuu nopeasti kun, liuennut hiilidioksidi haihtuu näytteestä (Leppäranta et al. 2017). pH mitattiin ioni-näytteistä, jotka olivat jäädytettynä kolme kuukautta. Näytteiden jäädyttämisen vuoksi piti näytepulloihin jättää ilmavaraa, mikä saattoi johtaa pH:n muutokseen.

#### 5.4.2. Laboratorioanalyysit

Näytteiden hivenainekoostumuksessa eniten vaihtelua pohjavesissä oli alumiinin, mangaanin, raudan ja arseenin suhteen (Taulukko 8). Havaintoputkessa HP10/99 osa pitoisuuksista ovat hyvin suuria. Näytteessä HP9701 alumiinin, vanadiumin, kromin, mangaanin, raudan ja arseenin pitoisuudet olivat huomattavasti keskimääräistä suurempia. Näytteessä HP02/00 korkeita pitoisuuksia havaittiin alumiinissa, mangaanissa, raudassa, koboltissa ja arseenissa. Havaintoputkesta HP9705 pumpattu vesi oli humuspitoista ja se erottui joukosta korkeilla mangaanin ja raudan arvoilla. Havaintoputkissa HP9701 ja HP10/99 mangaanin ja raudan pitoisuudet ylittivät talousveden laatutavoitteen raja-arvot (STM 1352/2015). Putkissa HP9705 ja HP02/00 vain raudan pitoisuus ylitti laatutavoitteen. Jokivesillä oli pohjavesiä korkeammat alumiini, rauta ja kupari pitoisuudet. Minipietsometrinäytteet MP1, MP2 ja MP3 erottuivat muista pohjavesinäytteistä korkeilla sinkki pitoisuuksilla. Jokivesinäytteet olivat keskenään hyvin samanlaisia, mutta Joki1 näyte erottui muista pintavesinäytteistä hieman korkeammilla alumiinin, mangaanin ja raudan pitoisuuksilla.

Pääionikoostumuksen yhteydessä määritetty ionitasapainoprosentti kaikkien näytteiden kohdalla oli pieni, joten tulokset ovat luotettavia (Taulukko 9). Kationeista eniten vaihtelua oli natriumissa ja magnesiumissa, kun taas anioneissa kaikki paitsi fluoridi vaihtelivat jonkin verran näytteiden välillä. Näyte HP02/00 erottui joukosta korkeilla natriumin ja kloridin pitoisuuksilla. Jokinäytteissä kaikki pitoisuudet ovat huomattavasti pienempiä kuin pohjavesinäytteissä, mutta jokinäytteet ovat keskenään hyvin samanlaisia.

Vesinäytteistä mitatut hapen ja vedyn stabiilit isotoopit sekä d-ylijäämä arvo ovat esitetty Taulukossa 10. Pohjavesien ja pintavesien isotooppikoostumukset eroavat oletetusti toisistaan. Jokivedet eroavat pohjavesinäytteistä selvästi pienemmällä d-ylijäämäärällä. Myös näytteen HP9701 d-ylijäämä on hieman pienempi kuin muilla pohjavesillä. Korkein d-ylijäämä arvo minipietsometrinäytteistä oli näytteellä MP1.



Taulukko 8. Näytteiden hivenainekoostumukset, määrittärajat ja talousveden laatuvaatimusten raja-arvot (STM 1352/2015). Sinisellä merkitty talousveden laatuvaatimukset ja punaisella laatuvaatimuksen ylittävät arvot. (vesinäytteissä 1 ppb = 1 µg l<sup>-1</sup>)

Näyte	Al (ppb)	V (ppb)	Cr (ppb)	Mn(ppb)	Fe (ppb)	Co (ppb)	Ni (ppb)	Cu (ppb)	Zn (ppb)	As (ppb)	Se (ppb)	Mo (ppb)	Cd (ppb)	Pb (ppb)	U (ppb)
Määrittärajat	5,0	0,01	0,02	0,5	1,5	0,002	0,01	0,16	0,4	0,0006	0,16	0,02	0,002	0,05	0,02
HP9701	26,13	5,98	1,37	312,7	7636,68	0,39	1,24	0,34	1,18	3,09	<0,16	0,38	0	0,06	1,18
HP9702	<5,0	0,07	0,04	<0,5	<1,5	0,03	2,19	0,26	<0,40	0,13	0,38	0,09	0,01	<0,05	0,12
HP9703	<5,0	0,18	0,14	<0,5	<1,5	0,03	1,19	0,28	0,45	0,1	0,2	0,22	0,02	<0,05	0,45
HP9704	<5,0	0,18	0,11	<0,5	<1,5	0,03	0,98	0,17	0,52	0,09	0,25	0,2	0,02	<0,05	0,63
HP9705	<5,0	0,29	0,09	34,51	918,77	0,26	1,15	0,18	1,06	1,63	<0,16	0,31	0,02	<0,05	1,23
HP9707	<5,0	0,18	0,12	<0,5	<1,500	0,06	0,92	<0,16	0,48	0,09	<0,16	0,19	0,02	<0,05	0,67
HP1	<5,0	0,15	0,13	<0,5	4,83	0,05	0,96	0,29	0,43	0,09	0,26	0,27	0,01	<0,05	0,45
HP01/00	<5,0	0,2	0,17	<0,5	<1,5	0,12	0,69	0,55	0,72	0,06	0,22	0,14	0,03	<0,05	0,64
HP02/00	14,38	0,34	0,13	15,06	2367,38	1,05	1,02	0,54	1,75	3,84	<0,16	0,41	0,04	<0,05	0,27
HP32/00	<5,0	0,12	0,24	<0,5	4,16	0,05	0,23	<0,16	1,08	0,1	<0,16	0,16	0,02	<0,05	0,65
HP53	<5,0	0,44	0,32	0,93	20,1	0,02	0,25	<0,16	0,49	0,37	<0,16	0,06	0,01	<0,05	1,06
HP25	22,18	0,2	0,19	<0,5	6,48	0,03	1,15	0,98	1,34	0,1	<0,16	0,3	0,02	0,75	0,65
GT4/05	<5,0	0,13	0,11	<0,5	<1,5	0,08	1,49	0,35	0,86	0,24	<0,16	0,25	0,02	<0,05	0,69
HP10/99	16,25	2,01	0,54	1746,96	40053,17	6,14	4,38	0,27	2,3	6,91	<0,16	0,77	0,01	<0,05	6,05
MP1	<5,0	0,26	0,15	1,89	2,05	0,05	0,93	0,25	46,84	0,11	0,18	0,34	0,02	<0,05	1,3
MP2	<5,0	0,23	0,31	1,79	4,09	0,07	1,05	<0,16	15,29	0,09	0,22	0,31	0,03	<0,05	1,49
MP3	<5,0	0,24	0,11	<0,5	1,71	0,04	1,25	<0,16	11,45	0,09	0,18	0,49	0,03	<0,05	1,56
MP4	<5,0	0,13	0,37	<0,5	4,95	0,08	1,17	0,44	0,76	0,15	0,26	0,32	0,02	<0,05	0,17
MP5	<5,0	0,15	0,51	<0,5	3,16	0,08	1,06	0,18	0,92	0,11	0,16	0,18	0,02	<0,05	0,59
Joki1	128,74	0,97	0,19	14,01	168	0,07	0,94	1,87	0,57	0,73	<0,16	0,77	0	0,2	0,69
Joki2	86,86	0,91	0,17	8,31	121,83	0,08	0,96	1,88	0,76	0,65	<0,16	0,58	0	0,16	0,75
Joki3	88,5	0,94	0,16	9,29	123,45	0,07	0,93	1,99	0,57	0,7	<0,16	0,62	0	0,17	0,77
Raja-arvot	200µg l <sup>-1</sup>		50µg l <sup>-1</sup>	50µg l <sup>-1</sup>	200µg l <sup>-1</sup>		20µg l <sup>-1</sup>	2,0 mg l <sup>-1</sup>		10µg l <sup>-1</sup>	10µg l <sup>-1</sup>		5,0µg l <sup>-1</sup>	10µg l <sup>-1</sup>	30µg l <sup>-1</sup>

Taulukko 9. Näytteiden pääionikoostumukset, ionisummat, ionitasapainoprosentti ja talousveden laatuvaatimusten raja-arvot (STM 1352/2015). Sinisellä on merkitty talousveden laatuvaatimet.

Näyte	Kationit		Ca (mg l <sup>-1</sup> )	Mg (mg l <sup>-1</sup> )	Aniionit		NO <sub>3</sub> (mg l <sup>-1</sup> )	SO <sub>4</sub> (mg l <sup>-1</sup> )	Alk (mmol l <sup>-1</sup> )	Ionisumma (meq l <sup>-1</sup> )		IB%
	Na (mg l <sup>-1</sup> )	K (mg l <sup>-1</sup> )			F (mg l <sup>-1</sup> )	Cl (mg l <sup>-1</sup> )				ΣKationit	ΣAniionit	
HP9701	23,88	3,93	23,58	8,24	0,39	49,88	0,11	11,08	1,26	2,99	2,92	1,26
HP9702	18,73	3,92	25,96	9,44	0,3	41,31	6,27	23	1,19	2,99	2,95	0,6
HP9703	12,94	3,06	20,69	7,4	0,09	24,75	11,22	23,41	0,89	2,28	2,26	0,48
HP9704	13,82	3,24	21,28	7,57	0,09	25,65	11,5	24,18	0,88	2,37	2,3	1,54
HP9705	11,04	3,14	22,3	6,71	0,09	22,94	9,97	20,91	0,95	2,23	2,2	0,64
HP9707	13,79	3,4	21,5	7,87	0,08	28,82	11,29	22,85	0,88	2,41	2,36	1,09
HP1	13,35	3,1	21,02	7,67	0,1	25,7	11,21	23,8	0,91	2,34	2,32	0,52
HP01/00	22,09	4,7	27,85	10,05	0,08	56,2	13,55	28,68	0,81	3,3	3,22	1,27
HP02/00	83,61	4,54	10,33	1,49	0,09	100,15	1,5	11,39	1,1	2,99	2,95	0,6
HP32/00	8,04	3,94	12,05	3,36	0,07	10,08	16,68	12,13	0,51	1,33	1,32	0,33
HP53	4,23	2,57	21,85	7,84		3,48	0,29	6,38	1,66	1,99	1,9	2,31
HP25	15,12	3,71	21,79	7,87	0,11	30,18	12,4	22,64	0,91	2,49	2,44	0,99
GT4/05	14,81	3,79	23,49	8,54	0,09	33,65	10,56	24,12	0,92	2,62	2,55	1,34
HP10/99	31,59	2,94	42,67	14,31	0,3	59,34	4,04	33,73	2,41	4,76	4,87	1,16
MP1	25,37	2,64	20,26	7,43	0,2	41,65	6,98	20,58	1,25	2,79	2,98	3,16
MP2	21,96	2,41	19,16	7,47	0,13	36,15	7,83	18,79	1,06	2,59	2,6	0,32
MP3	32,27	2,99	22,35	8,48	0,28	56,46	9,44	21,32	1,09	3,29	3,29	0,01
MP4	12,98	3,28	24,5	7,51	0,1	28,32	9,98	22,13	1,06	2,49	2,49	0,06
MP5	13,29	3,38	21,44	7,83	0,08	27,46	10,64	23,09	0,96	2,38	2,39	0,25
Joki1	7,97	2,53	10,37	4,73	0,22	9,39	0,48	10,73	0,73	4,76	4,87	1,16
Joki2	8,91	2,61	10,85	4,82	0,22	11,1	1,94	11,15	0,88	1,39	1,47	2,74
Joki3	7,98	2,6	10,55	4,72	0,22	9,36	0,37	10,91	0,75	1,33	1,27	2,41
Raja-arvot	200 mg l <sup>-1</sup>						50 mg l <sup>-1</sup>	250mg l <sup>-1</sup>				

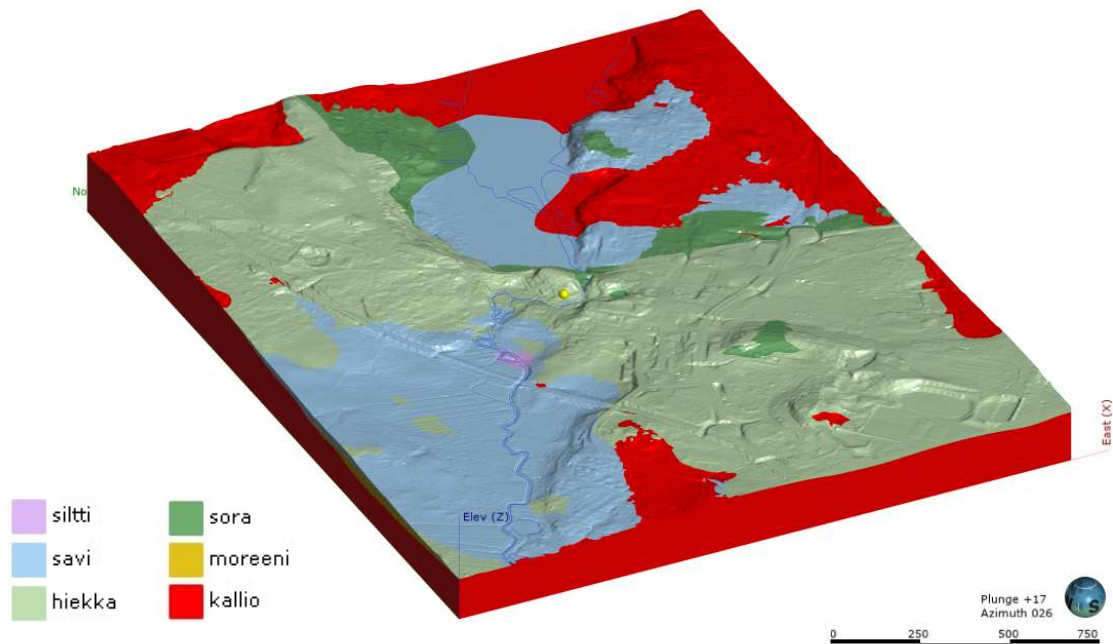
Taulukko 10. Näytteiden stabiilit isotoopit ja d- ylijäämäarvo.

Näyte	$\delta D$	$\delta^{18}O$	d-ylijäämä
HP9701	-80,76	-11,16	8,52
HP9702	-83,6	-11,72	10,16
HP9703	-85,19	-11,96	10,49
HP9704	-85,24	-11,93	10,2
HP9705	-85,12	-11,93	10,32
HP9707	-85,36	-11,96	10,32
HP1	-84,84	-11,98	11
HP01/00	-85,32	-11,99	10,6
HP02/00	-88,38	-12,44	11,14
HP32/00	-86,07	-12,11	10,81
HP53	-86,1	-11,92	9,26
HP25	-84,56	-11,9	10,64
GT4/05	-85,24	-11,96	10,44
HP10/99	-85,96	-12,02	10,2
MP1	-85,43	-12,12	11,53
MP2	-85,22	-12,01	10,86
MP3	-85,26	-12	10,74
MP4	-85,34	-11,92	10,02
MP5	-85,04	-11,97	10,72
Joki1	-69,67	-9,14	3,45
Joki2	-70,07	-9,23	3,77
Joki3	-69,27	-9,05	3,13
Joki4	-69,44	-9,13	3,6

### 5.5. 3D-hydrostratigrafinen rakennemalli

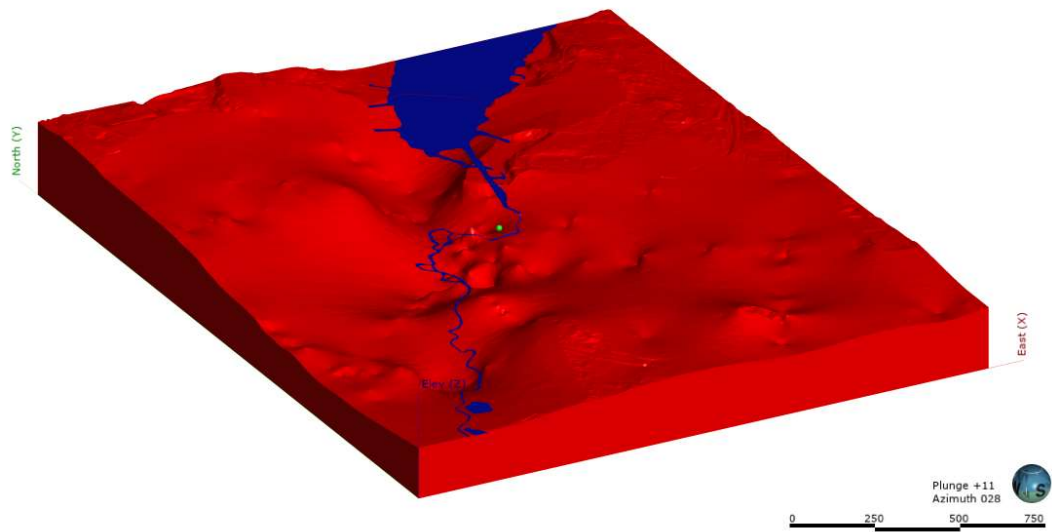
3D-rakennemalli luotiin helpottamaan kallionpinnan ja sen yläpuolelle kerrostuneiden maalajiyksiköiden hahmottamista Hyrylän pohjavesialueella. Rakennemallia on paras havainnoida mallinnusohjelmassa, jossa voi ottaa poikkileikkauksia tai esimerkiksi poistaa haluttuja kerroksia näkyvistä. Kuva valmiista 3D- rakennemallista esittää pohjan ulottuvuuden, korkeusmallin, pintamaalajit sekä Tuusulanjärven ja joen rajat (Kuva 20). 3D-rakennemalli on tarkimmillaan mallin keskellä, Koskenmäen vedenottamon läheisyydessä, missä kairaustietoa oli eniten saatavilla. Pintamaalajit mukailevat hyvin GTK:n maalaji karttaa, paitsi mallin reunoilla, jossa kallio nousee 3D-mallissa laajalla alueella maan pinnalle. Maanpinta on selvästi matalammalla koillis-lounaissuuntaisen murroslaakson kohdalla. Luode-kaakkosuuntainen harju kohottaa maanpintaa

murroslaakson kohdalla, missä Tuusulanjoki on uurtanut syvän uoman harjun poikki. Harjussa pintamaalaji on suurimmilta osin hiekkaa ja harjun ympäristössä koillisessa ja lounaassa vallitsevana pintamaalajina on savi.



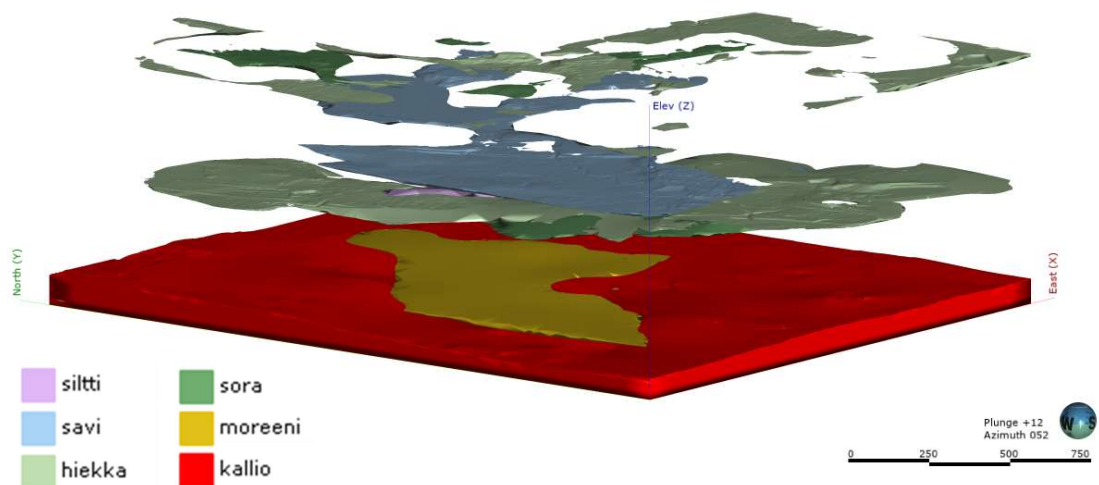
Kuva 20. 3D-rakennemalli lounaasta katsottuna. Keltainen pallo kuvaa Koskenmäen vedenottamon sijaintia. Kuva on otettu Leapfrog geo 5.1.2 ohjelmasta.

Kuvassa 21 on kallionpinta esitettynä Tuusulanjärven ja joen kanssa. Kallionpinnassa on selvästi nähtävissä koillis-lounaissuuntainen murroslaakso, jonka mukaisesti Tuusulanjärvi ja joki ovat sijoittuneet. Kallionpinta on hyvin tasainen 3D-rakennemallin luoteisnurkassa ja laskee jyrkästi kaakkoon päin tullessa. Itäreunalla kallionpinta on myös hyvin tasainen, mutta laskee loivemmin kaakosta luoteeseen päin. Koskenmäen vedenottamo ei sijaitse suoraan murroslaakson syvimmän kohdan päällä, vaan on sijoittunut siitä hieman itään, kuitenkin murroslaaksoon laskevan kallion päälle.



Kuva 21. Kallionpinta 3D-yksikkönä. Tuusulanjoki ja -järvi kuvassa sinisellä hahmottamassa sijaintia. Vihreä pallo kuvaa Koskenmäen vedenottamon sijaintia. Kuvasta on nähtävissä selvästi koillis-kaakkosuuntainen murroslaakso. Kuvassa on käytetty z- akselin liioittelukertoimena 2,5, jotta kallionpinnan muodot näkyisivät selvemmin.

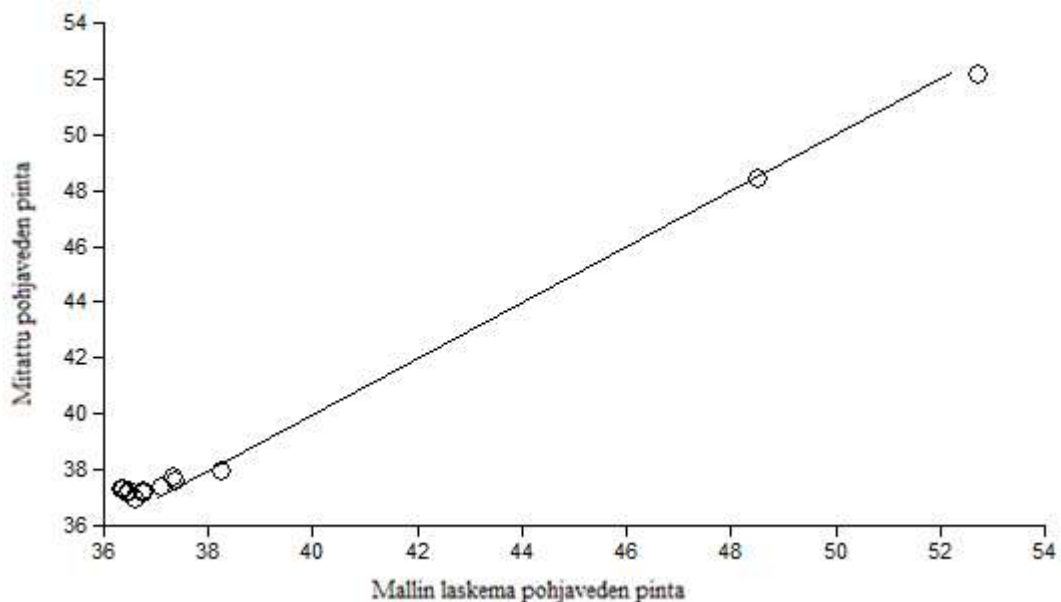
Murroslaakso täyttyy suurilta osin moreenilla, jonka päälle sora ja hiekka ovat kerrostuneet luode-kaakkosuuntaisen harjun myötäisesti (Kuva 22). Hiekka ja sora kerrosten välissä on saviyksikkö, joka on vallitsevana pintamaalajina harjun ulkopuolella. Keskellä mallinnettua aluetta on saven alla pieniä silttikerrostumia.



Kuva 22. Räjähdyskuva 3D-rakennemallista lounaasta katsottuna. Kaikki kallon päälle kerrostuneet maalajiyksiköt ovat esitetty tietyllä etäisyydellä toisistaan niiden kerrostumisjärjestyksessä.

## 5.6. Pohjaveden virtausmalli

Kalibroidussa pohjaveden virtausmallissa erot havaittujen ja mallin laskemien pohjaveden pintojen välillä kaikissa havaintoputkissa alle metrin (Kuva 23). Neliöllinen keskiarvo (RMSE) oli 0,61 ja poikkeama (BIAS) oli -0,42. Kalibroidun virtausmallin vesibudjetti (Flow budget) sekä havaittujen ja laskettujen pohjaveden pintojen vertailut ovat liitteissä (Taulukot 11 ja 12). Havaintoputkesta HP9703 on saatavilla jatkuvasti pohjaveden pinnankorkeustietoja ja vuoden aikana pohjaveden pinta vaihtelee siellä välillä +36,20...+37,17 mpy (Keski-Uudenmaan Vesi Kuntayhtymän Aquarex-mittaustulokset). Kalibroidussa virtausmallissa pohjaveden pinta vastaa pääosin hyvin mittaussarvoja. Poikkeuksena havaintoputki HP32/00, jonka pohjaveden pinnankorkeuden ohjelma laski kolme metriä matalammalle, kuin havaitun pinnan. Havaintoputkessa HP32/00 pohjaveden pinnankorkeus ei juuri vaihdellut mallin parametrien muuntelun myötä, joten sen katsottiin olevan erillään akviferin pääaltaasta, eikä sitä enää otettu huomioon mallin kalibroinnissa. Ylipäätään mallinnusohjelma laski pohjaveden pinnan noin puoli metriä havaittua pohjaveden pintaa korkeammalle.



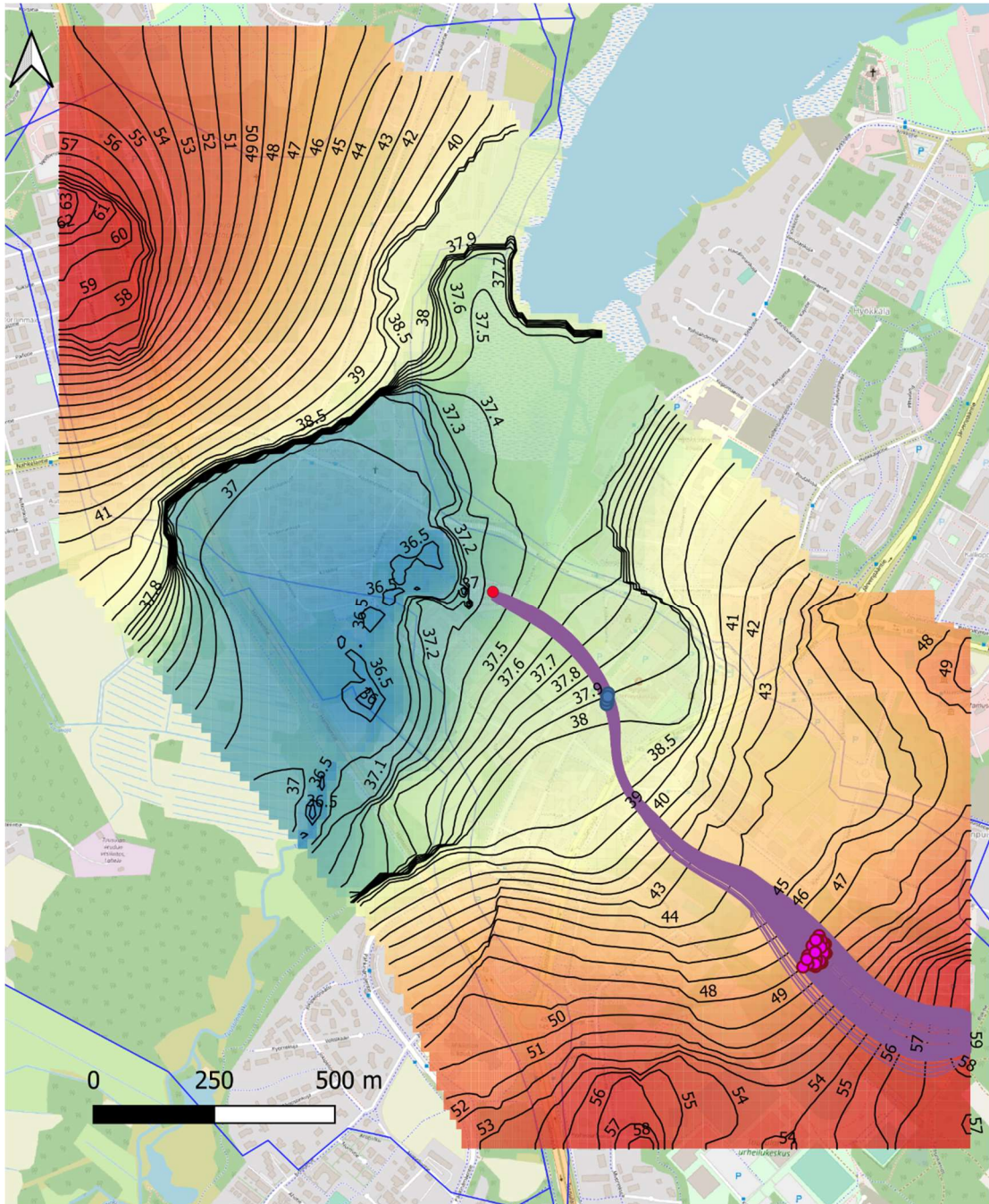
Kuva 23. Kuvaajassa x- akselilla mallin laskemat pohjaveden pinnat ja y- akselilla kesän kenttämittauksissa mitatut pohjaveden pinnat metreinä merenpinnan yläpuolella. Pallot kuvaavat havaintoputkien arvoja, joiden mittaustuloksia käytettiin mallin kalibroinnissa. Ero havaitun ja lasketun pohjaveden pinnan välillä on sitä pienempi, mitä lähemmäksi diagonaaliäiväa pallo osuu.

Murroslaakson lisääminen pohjaveden virtausmalliin oli merkittävä tekijä mallin kalibroinnissa. Murroslaaksossa vedenjohtavuus kalliossa on suurempi kuin muualla kalliossa ja sen määrittäminen madalsi mallinnusohjelman laskeman pohjaveden pintaa lähemmäs todellista. Myös soran ja hiekan vedenjohtavuusarvot saatiin vastaamaan laskettuja vedenjohtavuusarvoja murroslaakson suuremman vedenjohtavuuden ansiosta.

ModelMuse- virtausmallinnusohjelmassa saadut tulokset vietiin QGIS- paikkatieto-ohjelmaan, jossa tuloksia voitiin tarkastella yhdessä taustakartan kanssa. Mallinnettu pohjaveden pinta on hahmoteltu Kuvassa 24 samanarvokäyrillä. Pohjaveden pinta on keskellä mallinnettua aluetta, murroslaakson kohdalla, matalalla ja nousee kaakkoon sekä luoteeseen mennessä niin kuin kallionpintakin. Mallinnettu pohjaveden pinta Hyrylän pohjavesialueella on korkeimmillaan +63 mpy ja matalimmillaan +36 mpy. Koskenmäen vedenottamon kohdalla mallinnettu pohjaveden pinta on n. +37,3 mpy, mikä on hieman korkeampi kuin kenttämittauksissa havaittu pohjaveden pinta. Samanarvokäyrät eivät näytä tarkkoja korkeuksia kaikkialla, joten niiden perusteella ei voida kuvasta tulkita tarkkoja pohjaveden pinnankorkeuksia eri havaintoputkien kohdalla. Pohjaveden päävirtaussuunnat samanarvokäyrien perusteella ovat kaakosta ja luoteesta kohti Koskenmäen vedenottamo eli samoin kuin Kuvassa 1. Pohjaveden pinnankorkeuden vaihtelu on Koskenmäen vedenottamon läheisyydessä hyvin vähäistä ja pinta on keskellä mallia melkein horisontaali, joten siellä tarkkojen virtaussuuntien määrittämien on hankalaa.

Virtausmallinnus ohjelmassa partikkelien kulkeutumista voidaan seurata kulkeutumisreittien avulla. Koskenmäen kaivon soluille asennettiin 35 partikkelia, joista jokaisen kulkeutumispolku on kuvattu yhdellä violetilla viivalla. Virtausmalli laski vuoden ajalta kulkeutumispolun, joten mallin reunalle ulottuva polku tarkoittaa, että pohjavesi tulee vuoden aikana myös mallin rajojen ulkopuolelta. Partikkelin kulkeutumispolku eli kaivon sieppausalue on kapea sekä hieman mutkitteleva ja se ulottuu pitkälle kaakkoon mallin rajalle asti. Kaivon pumppausmäärä Kuvassa 24 on Koskenmäen keskimääräinen pumppausmäärä todellisuudessa, eli  $1000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ .





Kuva 24. Virtausmallinnuksen tulokset vietynä QGIS -paikkatietoohjelmaan. Punainen piste kuvaa Koskenmäen vedenottamon sijaintia. Mustat samanarvokäyrät kuvastavat mallinnettua pohjaveden pinnan tasoa metreinä merenpinnan yläpuolella. Violeetit viivat edustavat Koskenmäen kaivon sieppausaluetta.

Kulkeutumispolku laskettiin myös lyhyemmillä ajanjaksoilla, jotta voitaisiin tarkastella pohjaveden kulkeutumisaikaa tarkemmin. Pohjaveden virtausmallin ajaksi (Modflow time) asennettiin vuoden sijaan 10 ja 20 vuorokautta. Virtausmalli laski kulkeutumispolut näiden aikojen puitteissa ja kulkeutumispolkujen päätepisteet (End points) saatiin kuvamaan matkoja, jonka vesi kulkee 10 ja 20 vuorokaudessa. Kuvassa 24 siniset pisteet kuvaavat pohjaveden kulkeutumisen matkaa 10 vuorokaudessa ja vaaleanpunaiset pisteet kuvaavat 20 vuorokauden kulkeutumismatkaa.

Virtausmallin avulla pystyttiin myös testaamaan kaivolle eri suuruisia pumppausmääriä. Suurin mahdollinen pumppausmäärä, jonka malli pystyi ajamaan, Koskenmäen kaivossa oli  $2950 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ . Tämän suuremmilla pumppausmäärillä pohjaveden virtausmalli ei enää konvergoitunut. Todellisuudessa kaivon maksimi pumppausmäärä voi olla suurempi, sillä virtausmallin maksimi tulokset ovat vain mallinnusteknisiä maksimeja. Suurin mahdollinen pumppausmäärä Koskenmäen vedenottamolla virtausmallin mukaan oli kuitenkin  $2950 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ , joka ylittää hieman vedenottamolle annetun vesilain mukaisen vedenotto luvan ( $2700 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ )(LSVEO 8/1999/1). Kaivon sieppausalue pysyi samana pumppausmäärästä huolimatta. Koskenmäen kaivon pumppausmäärän suurentaminen  $2950 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ :een, ei muuttanut 10 ja 20 vuorokauden kulkeutumismatkoja, sillä pohjaveden kulkeutumisnopeus ei muuttunut merkittävästi suuremman pumppausmäärän takia.

Murroslaakson vaikutuksen selvittämiseksi pohjaveden virtausmalli ajettiin myös ilman murroslaaksoa, missä kallion vedenjohtavuusarvot pysyivät kaikkialla samana. Ilman murroslaaksoa pohjaveden virtausmalli pystyi konvergoitumaan  $3950 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  vedenottoon asti. Murroslaakso virtausmallissa siis pienensi vedenottamon päivittäistä maksimipumppausmäärää, minkä perusteella voidaan tulkita, että murroslaakso vaikuttaa Koskenmäen vedenottamon antoisuuteen sitä vähentävästi. Koskenmäen kaivon sieppausalue ei kuitenkaan muuttunut, vaikka murroslaaksoa ei malliin määritetty, mikä saattaa johtua siitä, että hydraulisen gradientin kaltevuus on samaan suuntaan murroslaakson vedenjohtavuusarvomuutoksesta riippumatta (Seppälä ja Tuominen 2005, Åberg et al. 2021).

## 6. TULOSTEN TARKASTELU

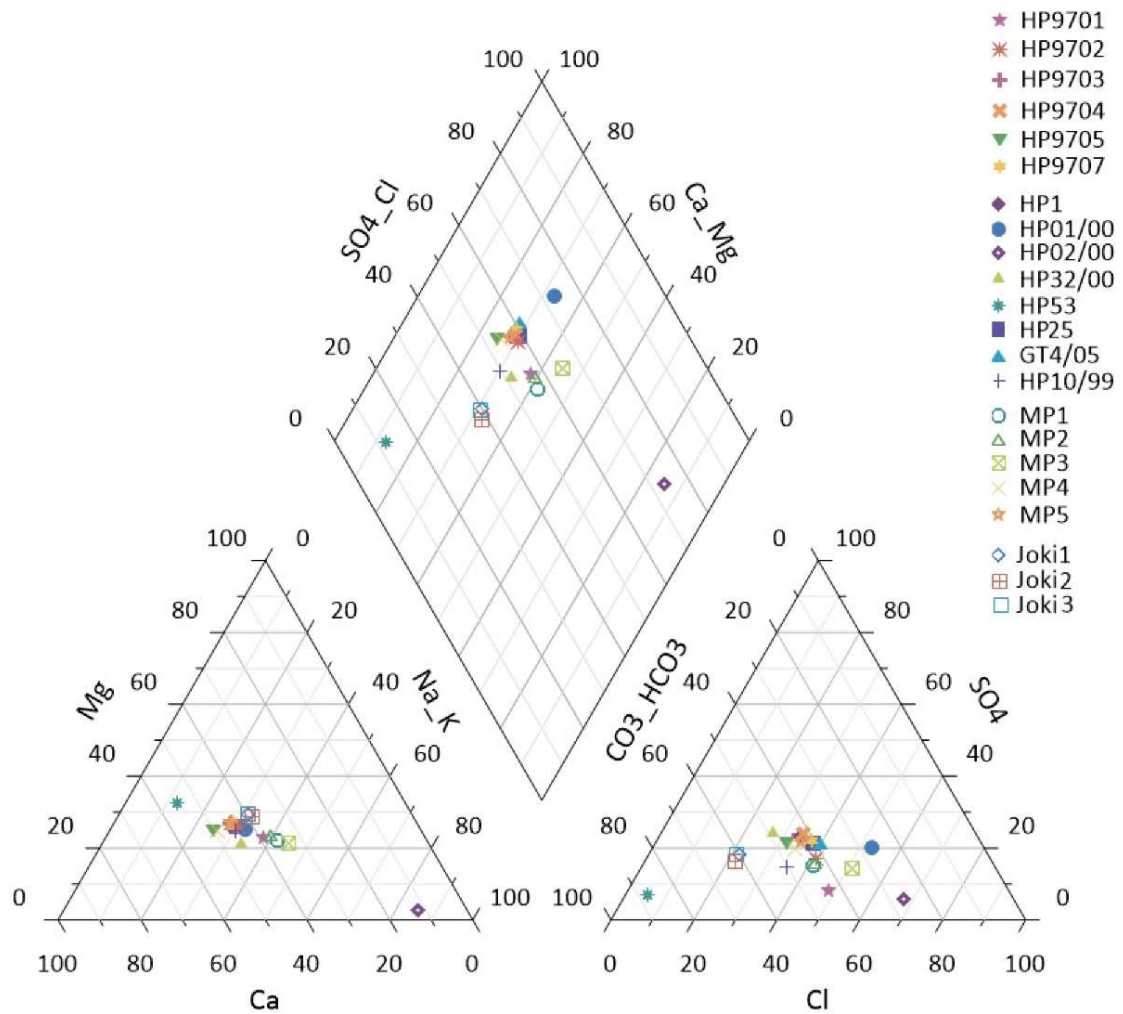
### 6.1. Pohjaveden laatu

Hyrylän pohjavesialueelta otettiin koko tutkimusalueen kattavasti pohjavesi- ja pintavesinäytteitä. Pohjavesinäytteitä otettiin kaikista saatavilla olevista pohjaveden havaintoputkista ja pintavesinäytteitä eri osista Tuusulanjokea. Pohjavesien laatu oli Koskenmäen vedenottamon läheisyydessä eli keskellä tutkimusaluetta hyvin tasalaatuista sekä talousveden laatuvaatimusten mukaista. Tässä kappaleessa syvennyttään tarkemmin näytteiden laatu- ja koostumuseroihin sekä selvitetään mahdollisten erojen syitä.

#### 6.1.1. Pääionikoostumus

Näytteiden pääionien (Na, K, Ca, Mg, F, Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> ja HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) pitoisuudet tuotiin Golden softwaren tarjoamaan Grapher -ohjelmaan, jonka avulla tuloksista tehtiin Piper- ja Stiff-diagrammit. Piper-diagrammilla voidaan vertailla kaikkien näytteiden pääionikoostumusta yhdessä kuvaajassa (Kuva 25). Vesinäytteiden pääionikoostumukset ovat suurimmilta osin yhteneväiset ja ne ryhmittyvät diagrammissa yhteen suureen ryhmään. Näytteessä HP53 on merkittävästi suurempi bikarbonaatti (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) pitoisuus ja HP02/00 eroaa muista huomattavasti suuremmilla natriumin ja kloridin pitoisuuksilla. Havaintoputki HP02/00 sijaitsee aivan kantatien 45 varrella, joten tien suolaus on nostanut pohjaveden natriumin ja kloridin pitoisuutta.

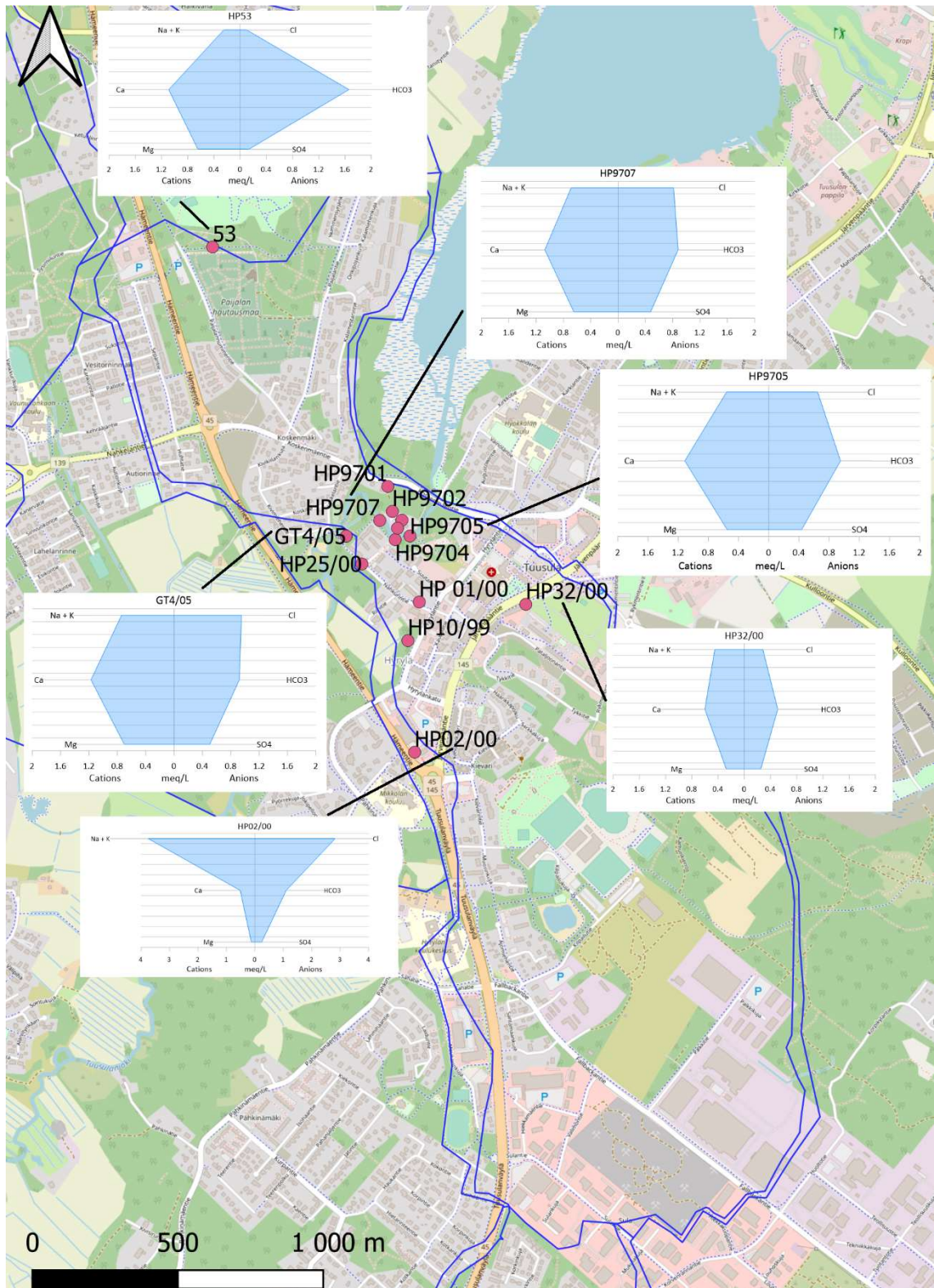
Piper-diagrammin perusteella suurin osa vesinäytteistä on tyypiltään Ca-HCO<sub>3</sub> sekoitusvesiä. Näyte HP53 on selkeästi tyypiltään Ca-HCO<sub>3</sub> vettä, mutta myös jokivedet sijoittuvat Ca-HCO<sub>3</sub> vesityyppiryhmään. Havaintoputken HP02/00 vesi on tyypiltään Na-Cl vettä.



Kuva 25. Grapher ohjelmalla tehty Piper-diagrammi.

Näytteiden pääionikoostumusta kuvaavilla Stiff-diagrammeilla voidaan tarkastella yksittäisten näytteiden ionikoostumusten eroja tarkemmin. Kuvassa 26 on Stiff-diagrammeja sijoitettuna kartalle. Tutkimusalueen keskellä, Koskenmäen vedenottamon läheisyydessä, vesi on ionikoostumukseltaan hyvin samanlaista, mutta tutkimusalueen reunoilla havaintoputkissa HP02/00, HP32/00 ja HP53, vesi ei vastaa ionikoostumukseltaan alueen tyypillistä pohjavettä.

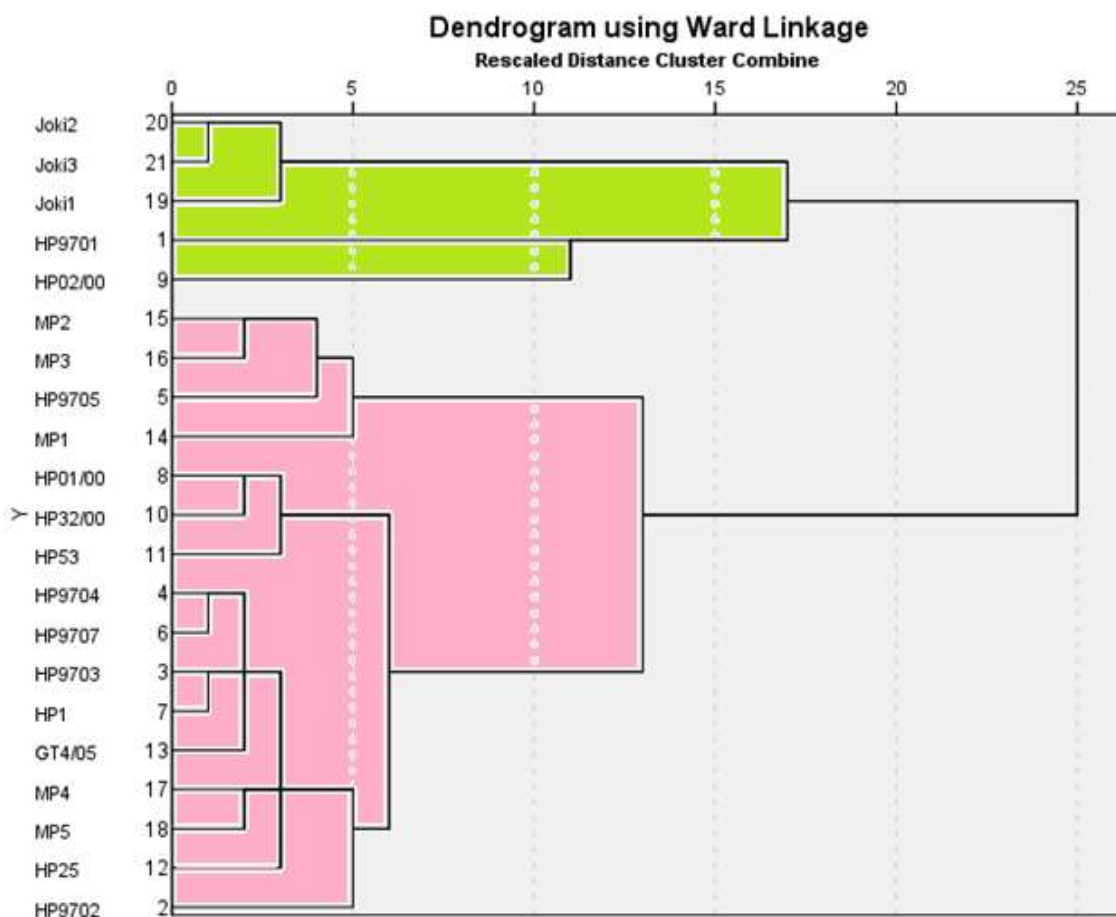




Kuva 26. Grapher ohjelmalla näytteistä tehtyt Stiff-diagrammit vietyinä kartalle. HP02/00 stiff- diagrammissa, minimi ja maksimi arvot ovat suurempia kuin muissa, sillä sen Na ja Cl pitoisuudet ovat niin korkeat.

### 6.1.2. Hivenaineet

Näytteiden kaikki laboratoriotulokset tuotiin SPSS- ohjelmaan, jossa tehtiin klusterianalyysi hivenainepitoisuuksista (hierarkinen klusterianalyysi, Wardin menetelmä, Euclidean etäisyys). Ohjelma standardoi aineistot välille 0 – 1 ennen analyysiä. Klusterianalyysi jakoi näytteet ryhmiin niiden Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Pb ja U pitoisuuksien perusteella (Kuva 27). Analyysin mukaan vedet jakautuivat kahteen pääryhmään (vihreä ja vaaleanpunainen). Näytteet HP9701 ja HP02/00 olivat eniten pintavesien kaltaisia, joten ne sijoituivat jokivesinäytteiden kanssa vihreään ryhmään. Loput pohjavesinäytteet sijoituivat vaaleanpunaiseen ryhmään.



Kuva 27. Hyrylän vesinäytteiden hivenainekoostumuksen perusteella SPSS-ohjelmalla tehty dendogrammi. Värit edustavat kahta eri pääryhmää.

Minipietsometrinäytteistä MP1, MP2 ja MP3 sijoittuvat vielä pienempään alaryhmään erikseen muista pohjavesinäytteistä ja kauas minipietsometrinäytteistä MP4 ja MP5. Näytteet MP1, MP2 ja MP3 ovat otettu Tuusulanjoen luoteismutkassa, kun taas MP4 ja MP5 ovat otettu enemmän idässä. Vaikka minipietsometrinäytteet ovat otettu suhteellisen lähekkäin toisiaan, on näiden kahden alaryhmän koostumus erilainen, mikä tarkoittaa pohjaveden tulevan MP1, MP2 ja MP3 näytteenottopaikalle luoteesta, kun taas MP4 ja MP5 näytteenottopaikalle pohjavesi virtaa idästä/kaakosta. Myös Brander (2013) on tutkimuksessaan havainnut Tuusulanjokeen purkautuvan pohjaveden olevan MP1, MP2 ja MP3 näytteenotto kohdalla peräisin lounaasta ja luoteesta.

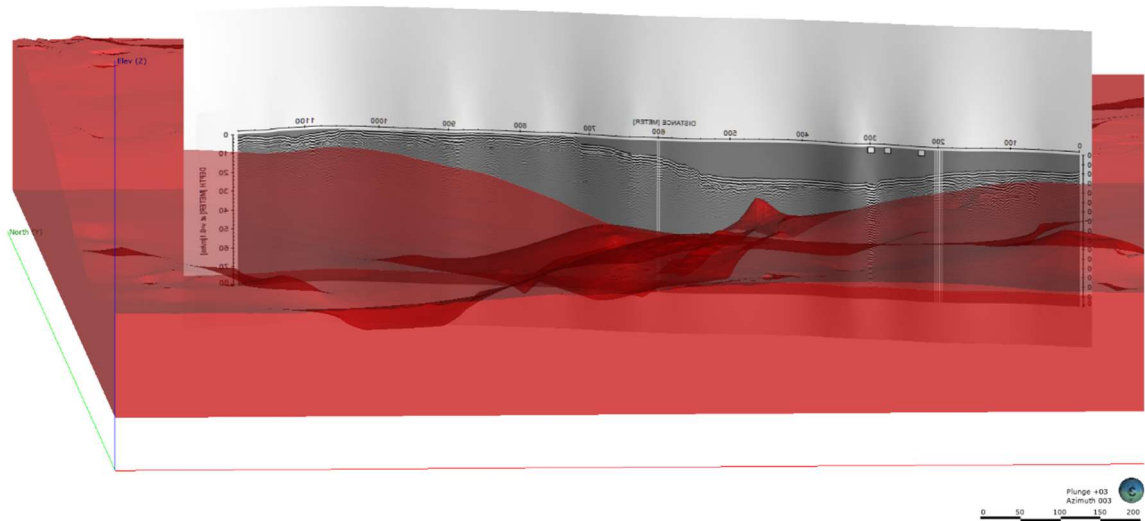
## **6.2. Pohjavesialueen rakenne ja pohjaveden virtauskuva**

### *6.2.1. Maatutkaluotaus pohjavesialueen geologisen rakenteen selvittämisessä*

Tulokset osoittivat, että maatutkaluotaus Hyrylän taajamassa ei tuonut juurikaan lisätietoa. Alueella oli liian paljon luotaussignaaleja häiritseviä tekijöitä, etteivät sähköpulssit pystyneet tunnistamaan pohjaveden pintaa muualla kuin päällystämättömillä ja silttiä karkeamman maaperän alueilla (linjat 0014 ja 0015). Kallionpinta oli suuressa osassa aluetta niin syvällä, ettei 30 MHz maatutkaluotaimenkaan syvyysulottuvuus riittänyt havaitsemaan kallionpintaa. Maaperän hienoainespitoisuus ja päällystetyt pinnat heikensivät luotaussyvyyttä, mikä teki kallionpinnan havainnoinnista erittäin vaikeaa. Parempia tuloksia taajamassa voisi saada yö aikaan tehdyillä mittauksilla, jolloin luotaussignaaleja häiritsevää liikennettä ei olisi niin paljon.

Maatutkaluotausprofiileja vietiin 3D-mallinnusohjelmaan tarkasteltavaksi (Kuva 28). Valmiin 3D-mallin avulla pystyttiin vertailemaan maatutkaprofiilien tulkintoja ja jo valmiiksi mallinnettuja kallion ja pohjaveden pintoja. 3D-mallinnettua kallionpintaa verrattiin maatutkalinjaan 0011, eikä luotausprofiilista löydetty yhteneviä tulkintoja 3D-mallin kanssa. On kuitenkin otettava huomioon, ettei maatutkaluotausprofiileille tehty syvyyskorjauksia kerrosten vesikylläisyyden perusteella, joten profiilia ja 3D-mallia ei voida täydellisesti verrata toisiinsa. Vertailusta voidaan kuitenkin päätellä, etteivät pelkät maatutkaluotausprofiilit olisi auttaneet Hyrylän geologisen rakenteen selvittämisessä.

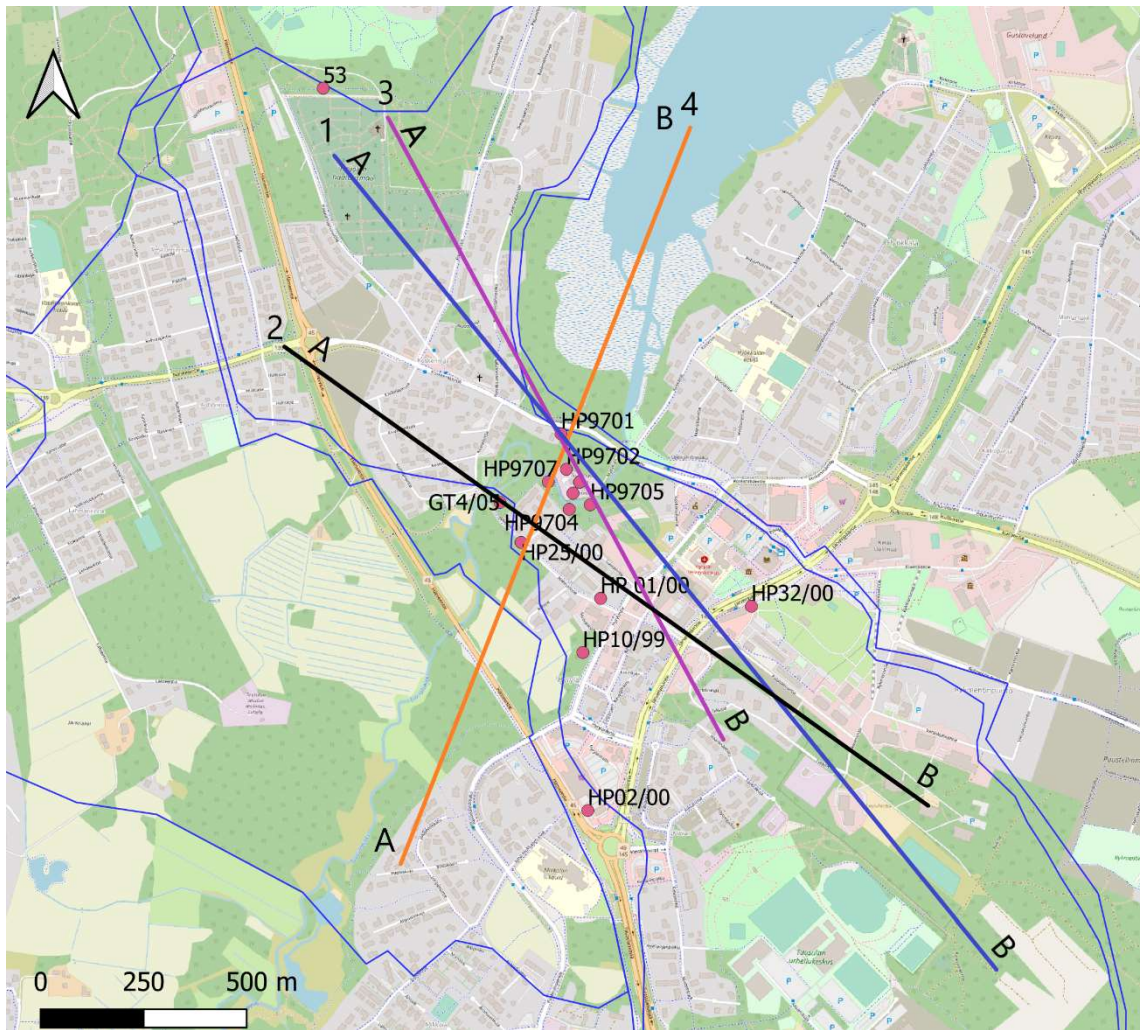




Kuva 28. Maatutkalinjaa (linja 0011) verrattiin valmiiseen kallionpintaan Leapfrog Geo 3D-mallinnusohjelmassa.

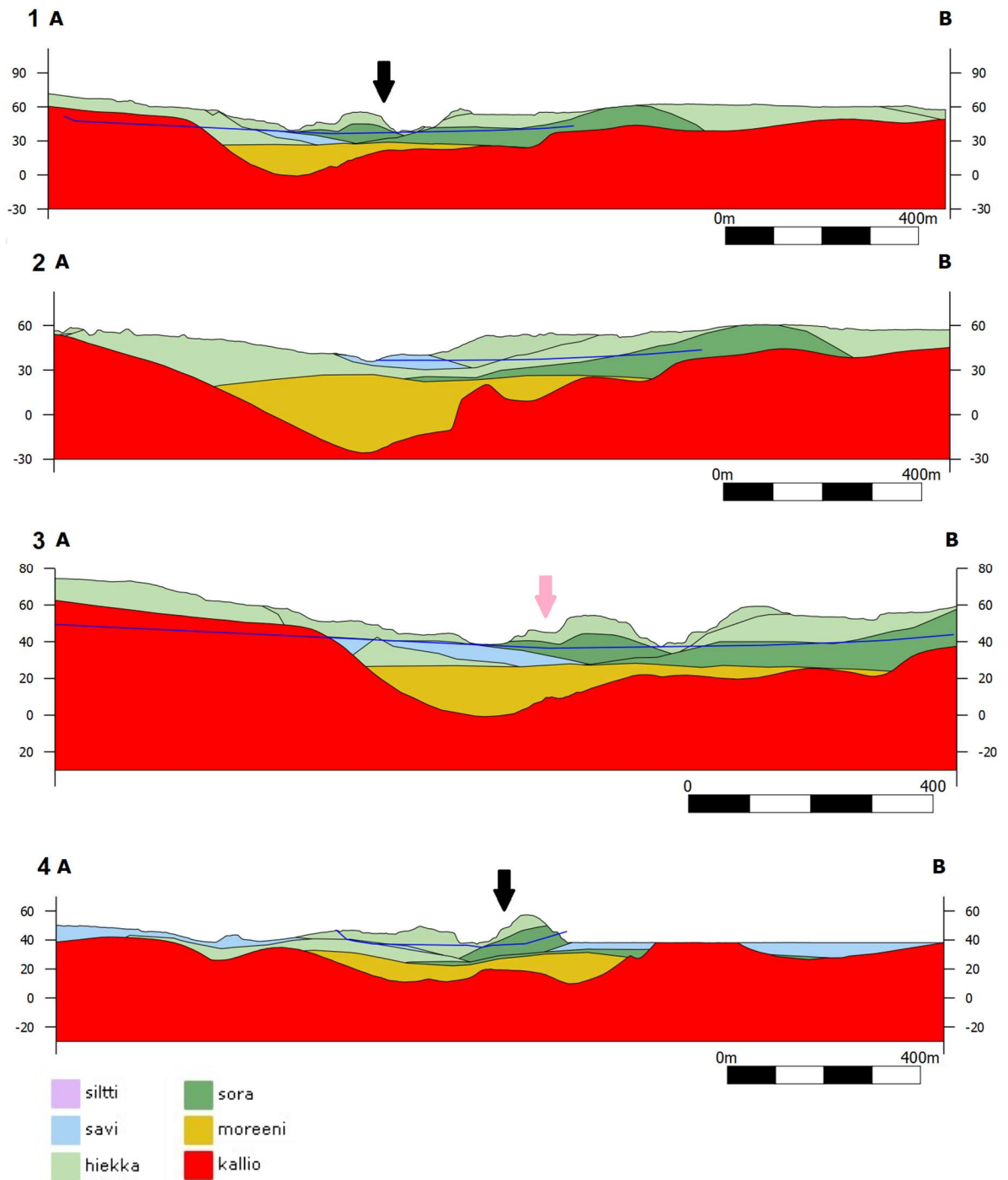
### 6.2.2. 3D-mallin poikkileikkaukset

3D-rakennemallista otettiin poikkileikkauksuvia alueen geologisen rakenteen tulkitsemisen ja tulosten tarkastelun avuksi. Poikkileikkaukset kattavat Koskenmäen kaivon sieppausalueen, murroslaakson ja havaintoputken HP9701 alueen. Kuvaan 29 on merkitty poikkileikkausten sijainnit kartalla. Poikkileikkauksiin on merkitty pohjaveden pinta sinisellä viivalla. Pohjaveden pinta kattaa vain sen alueen, jolta pohjaveden pinnankorkeuksia mitattiin kenttätutkimuksissa kesällä 2020.



Kuva 29. Poikkileikkaukset kartalla. Poikkileikkauslinjat on numeroitu 1 - 4 ja ne on merkitty eri värein. Kartalla on myös havaintoputkien sijainnit vaaleanpunaisilla palloilla.

Poikkileikkauslinja 1 on pisin linja ja se kuvaa harjun kerrosrakennetta harjun pituussuunnassa (Kuva 30). Linja 1 kulkee myös osittain pitkin Koskenmäen kaivon sieppausaluetta kaakossa. Poikkileikkaukseen on mustalla nuolella merkitty Koskenmäen vedenottamon sijainti. Vedenottamo sijaitsee sorakerroksen päällä, joka ulottuu kaakkoon. Virtausmallin laskema Koskenmäen kaivon sieppausalue myötäilee tätä sora muodostumaa soran suuren vedenjohtavuusarvon vuoksi. Koskenmäen vedenottamon luoteispuolella sijaitsee murroslaakso, johon on kerrostunut paksu kerros moreenia. Kallionpinta nousee jyrkästi luoteessa ja pysyy hyvin tasaisena pohjoisessa. Kallion päällä pohjoisessa on vain ohut kerros hiekkaa.



Kuva 30. 3D-mallista otetut poikkileikkauskuvat. Mustat nuolet kuvaavat Koskenmäen vedenottamon sijaintia linjoilla 1 ja 4. Vaaleanpunainen nuoli kuvaa havaintoputken HP9701 sijaintia linjalla 3. Kuvissa on käytetty Z- akselin liioittelukertoimena 3, jotta maaperän kerrokset näkyisivät selvemmin.

Poikkileikkauslinja 2 kuvaa murroslaakson syvintä kohtaa Hyrylän pohjavesialueella. Kallionpinta on hyvin epätasainen kaakkoon mentäessä ja nousee taas jyrkästi luoteeseen. Soran päällä oleva hiekkakerros loppuu poikkileikkauksen keskellä saveen, joka on pintamaalajina harjun eteläpuolella. Soraa nähdään vain pohjavesialueen itäpuolella.

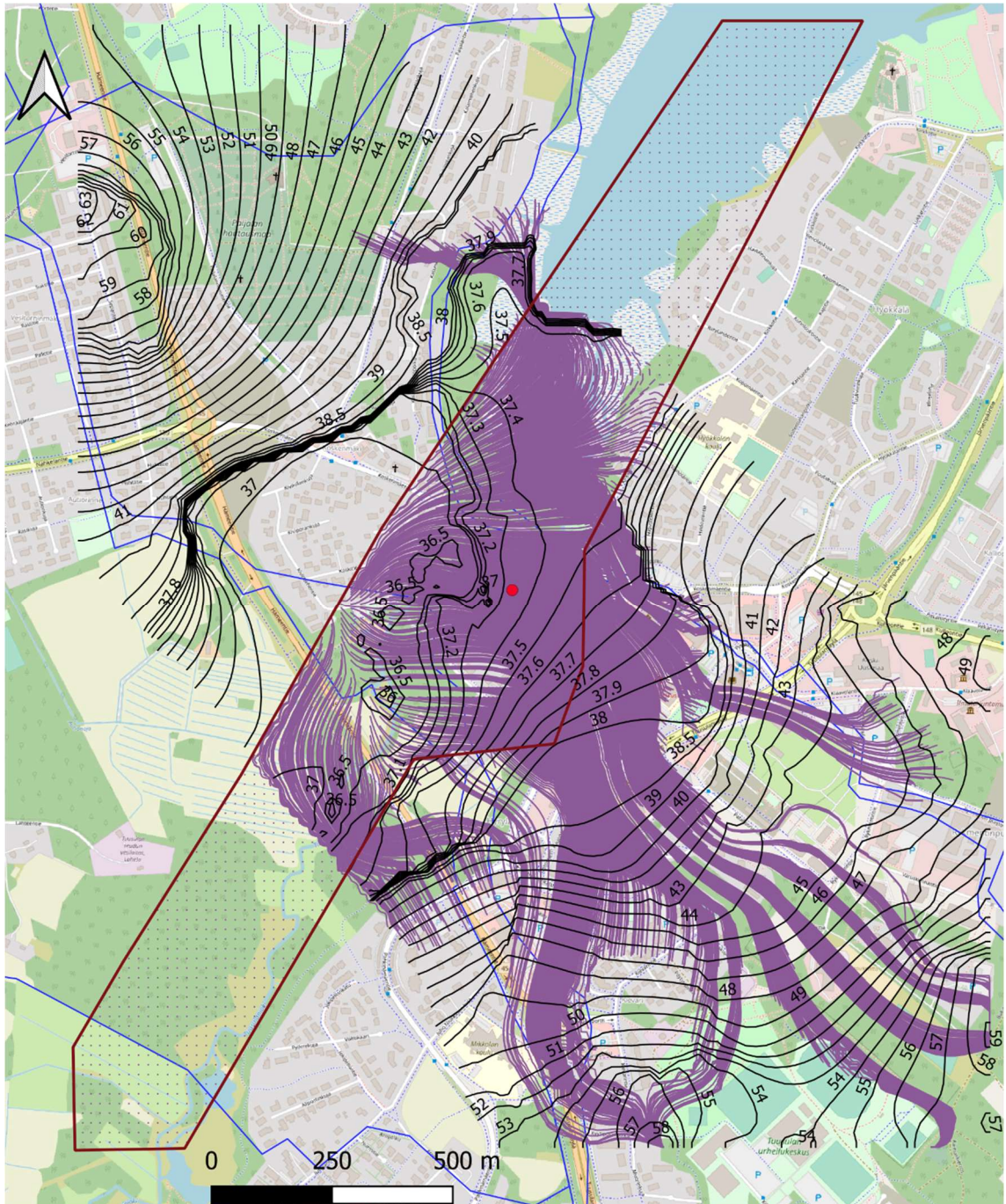
Poikkileikkauslinjalla 3 voidaan tarkastella tarkemmin kemiallisilta ominaisuuksiltaan muista pohjavesistä poikkeavaa havaintoputkea HP9701. Poikkileikkauksessa näkyy soran ja hiekan väliin muodostunut pieni saviyksikkö. Havaintoputken HP9701 siiviläosuus ylettyy kuitenkin savikerroksen alle, joten pohjavesi havaintoputkessa HP9701 on peräisin savikerroksen alapuolisista kerroksista.

Linja 4 on poikkileikkaus murroslaakson pitkittäissuunnassa. Etelässä ja pohjoisessa on kallion päällä vain savikerros, mikä osoittaa moreenin, hiekan ja soran vallitsevan vain harjun alueella. Murroslaaksossa kallionpinta on pitkittäissuunnassakin epätasainen ja nousee pohjoisessa maanpinnan yläpuolelle. Tuusulanjärvi sijaitsee savikerroksen päällä, mutta sen etelärannan kosteikko ylettyy osittain kalliokohouman päälle. Kalliokohouman ansiosta vesi saattaa Tuusulanjärvestä ajoittain kulkeutua kallion rakoja pitkin pohjavesiakviferiin, mikä selittäisi havaintoputkessa HP9701 isotooppimääritysten perusteella havaitun haihtuneisuuden.

### *6.2.3. Murroslaakson vaikutus pohjaveden liikkeisiin*

Murroslaakson vaikutusta pohjavesialueeseen tutkittiin virtausmallinnuksen MODPATH- työkalulla, missä jokaiselle murroslaakson solulle laskettiin partikkelin kulkeutumispolku vuoden ajalta. Murroslaakson soluille määritettiin jokaiselle vain yksi partikkeli, jonka polkua seurattiin. Kuvassa 31 veden kulkeutuminen murroslaakson eri kohtiin on kuvattu violeitin kulkeutumispolku -viivoin samoin, kuin Koskenmäen kaivon sieppausaluekin kuvassa 24. Kulkeutumispolku on laskettu MODPATH:n backward tracking- työkalulla, joka näyttää, mistä vesi kuhunkin murroslaakson soluun virtaa. Vesi murroslaaksoon on suurilta osin peräisin idästä ja kaakosta, mutta lännestä sinne ei kulkeutumispolkujen mukaan virtaisi ollenkaan pohjavettä. Pohjoisesta kapealta kaistaleelta ja Tuusulanjärveltä virtaa vettä murroslaakson pohjoisosiin.

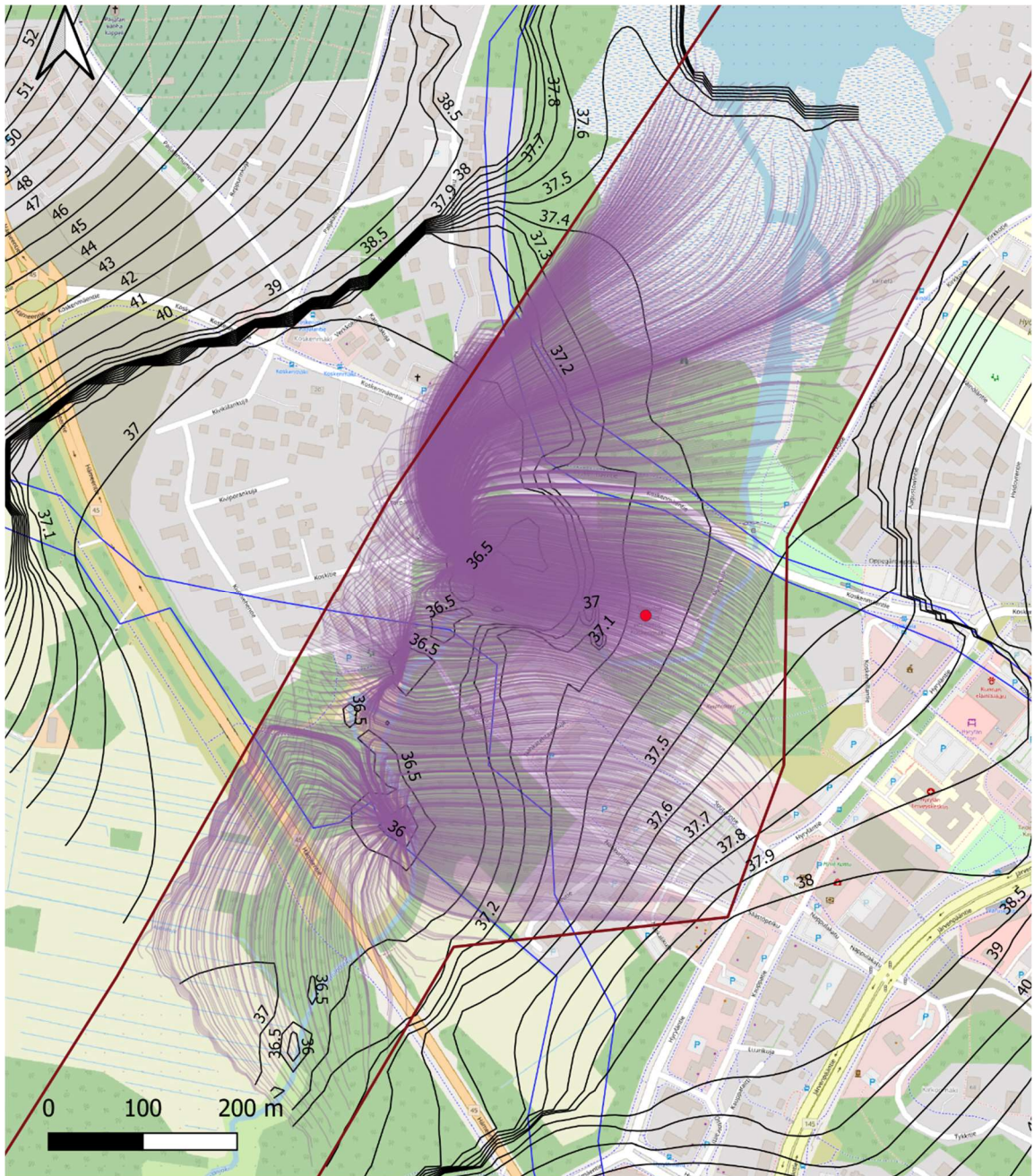




Kuva 31. Veden kulkeutuminen murroslaaksoon (Backward tracking) on kuvattu violetein viivoin. Vesi murroslaaksossa on peräisin suurimmilta osin kaakosta. Virtausmalliin määritellyn murroslaakson rajat on merkattu tummanpunaisella viivalla ja pohjaveden pinnankorkeudet mustilla samanarvokäyrillä.



Veden kulkeutumista voidaan myös seurata toisin päin, eli mihin suuntaan vesi valitusta solusta virtaa tulevaisuudessa. Veden kulkeutumista murroslaaksossa tutkittiin myös mallinnusohjelman MODPAHT:n forward tracking -työkalulla, jossa viivat kuvaavat partikkeleiden kulkeutumispolkua tulevaisuudessa. Murroslaakson jokaisesta solusta lähtee yksi kulkeutumispolku ja Kuvasta 32 nähdään, että kaikki murroslaakson kulkeutumispolut päättyvät kolmeen eri sumaan.



Kuva 32. Violetit viivat kuvaavat nyt veden kulkeutumista lähtöpisteestä ajassa eteenpäin. Kulkeutumispolut päättyvät Tuusulanjokeen, mikä tarkoittaa pohjaveden purkautumista siellä Tuusulanjokeen.

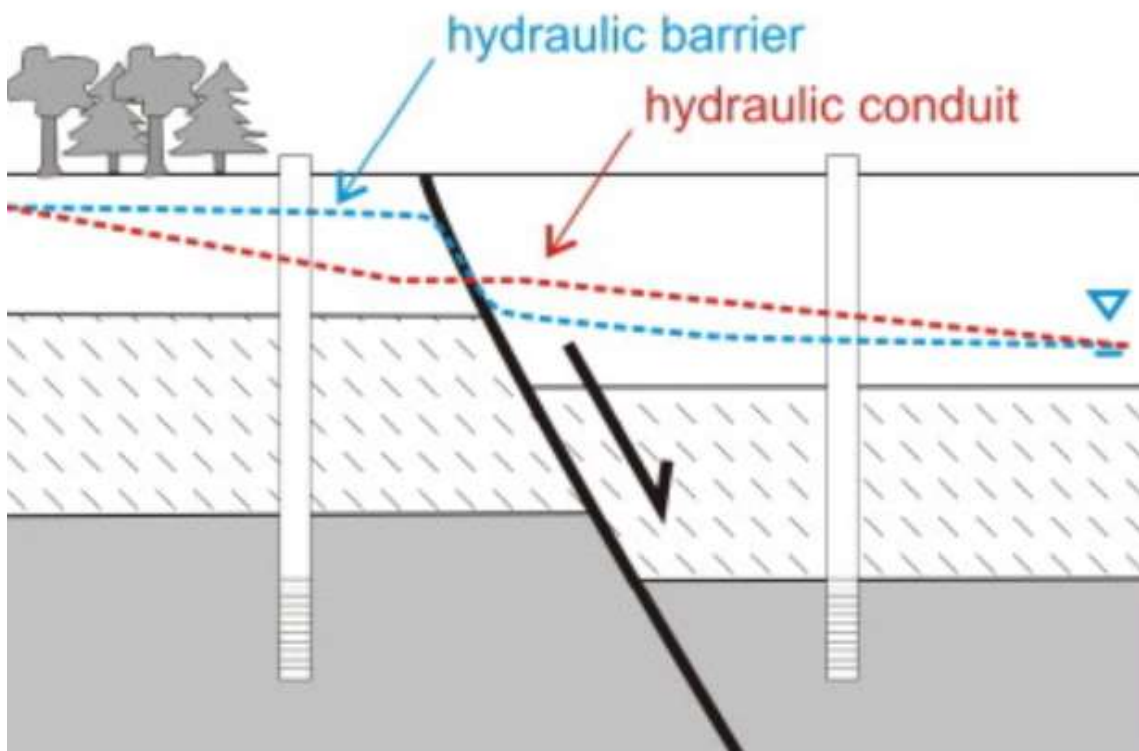
Sumat ovat Tuusulanjoen kohdalla ja viivat nousevat niissä maanpinnan yläpuolelle, mikä tarkoittaa forward tracking- työkalun kohdalla, että siellä pohjavesi purkautuu jokeen. Pohjoisesta virtaava pohjavesi kiertää Koskenmäen vedenottamon sen länsipuolelta ja purkautuu jokeen, mikä saattaa selittää murroslaakson pienentävän vaikutuksen vedenottamon pumppausmäärään. Virtausmallin mukaan pohjavesi ei kulkeudu murroslaakson ulkopuolelle, vaan purkautuu Tuusulanjokeen kolmessa eri kohtaa. Kahdessa eteläisemmässä purkautumiskohdassa pintamaalajina on kuitenkin savi, jonka vedenjohtavuus on hyvin heikkoa eikä alueella ole fyysisin tutkimuksin vielä todettu pohjaveden purkautuvan jokeen. Virtausmallin ennustamista pohjaveden purkautumispaikoista voidaan todistaa oikeaksi vain pohjoisin purkautumisalue, jossa tässä tutkimuksessa termisin menetelmin ja suotovirtaamamittarin avulla todistettiin pohjaveden purkautuvan Tuusulanjokeen

Kuvien 31 ja 32 kulkeutumispolkujen perusteella murroslaaksoon ei virtaisi vettä pohjavesialueen lounaispuolelta. Virtausmalli ajettiin myös vuotta pidemmillä ajoilla (Modflow time), mutta kulkeutumispolut eivät muuttuneet merkittävästi edes kymmenen vuoden kohdalla. Aikaisempien tutkimusten perusteella (Breilin et al 2005 ja Keskitalo 2018) pohjaveden päävirtaussuunta olisi myös lounaasta Koskenmäen vedenottamolle päin. Myös virtausmallin laskemien pohjaveden pinnankorkeuksien samanarvokäyrien perusteella virtaus näyttäisi olevan pohjavesialueen luoteisosista kohti murroslaaksoa. Virtaus on aina suuremmasta kohti pienempää samanarvokäyrää (Seppälä ja Tuominen 2005, Åberg et al. 2021). Pohjavesialueen pohjoisosassa samanarvokäyrät laskevat myös koilliseen, jolloin pohjavesi kulkeutuisi Tuusulanjärvelle päin ja sieltä kautta virtaisi murroslaaksoon Kuvan 31 mukaisesti. Pohjoisesta virtaava pohjavesi kiertää Koskenmäen vedenottamon länsipuolelta ja purkautuu jokeen mutkassa, jonne myös idästä virtaava pohjavesi purkautuu. Mahdollinen virtaus etelästä pilaantuneelta alueelta Koskenmäelle päin virtausmallin tulosten perusteella virtaisi Tuusulanjoen alajuoksulle, missä pohjaveden pinta on matalimmillaan ja purkautuisi siellä Tuusulanjokeen Kuvan 32 mukaisissa purkautumispaikoissa.

Pohjaveden virtaamattomuus Hyrylässä lounaasta kohti murroslaaksoa saattaa selittyä murroslaakson ja kiinteän kallion hydraulisen johtavuuden muutoksen vaikutuksesta pohjaveden pinnan korkeuteen. Bensen et al. (2013) mukaan siirros kallioperässä voi vaikuttaa pohjaveden pintaan ja sitä kautta muuttaa paikoin äkillisesti hydraulista gradienttia ja pohjaveden virtaussuuntaa. Siirroksen kohdalla pohjaveden pinta nousee tai



laskee paikallisesti siirroksen molemmin puolin siirroksen vedenjohtavuudesta riippuen (Bense et al. 2013). Kuvassa 33 on havainnollistettu pohjaveden pinnan muutosta siirrosvyöhykkeen alueella. Kuvassa 33 pohjaveden pinta laskee vasemmalta oikealle, missä punainen ja sininen katkoviiva kuvaavat pohjaveden pinnan tasoa siirroksen kohdalla riippuen siirroksen hydraulisesta johtavuudesta suhteessa taustakallioon. Punaisen katkoviivan tapauksessa siirroksen vedenjohtavuus on suurempi kuin kallion, mikä aiheuttaa pohjaveden pinnassa paikallisen muutoksen (Bense et al 2013).



Kuva 33. Pohjaveden pinta nousee paikallisesti kallion siirroksen kohdalle riippuen siirroksen vedenjohtavuuksista suhteessa kallioon. Siirroksen hydraulisen johtavuuden ollessa suurempi, kuin kallion, pohjaveden pinta vastaa punaisen viivan muotoa. Jos siirroksen johtavuus on alhaisempi, kuin kallion, pohjaveden pinnan muoto vastaa enemmän sinisen viivan muotoa. Kuva muokattu Bense et al. (2013) kuvan 1a mukaan.

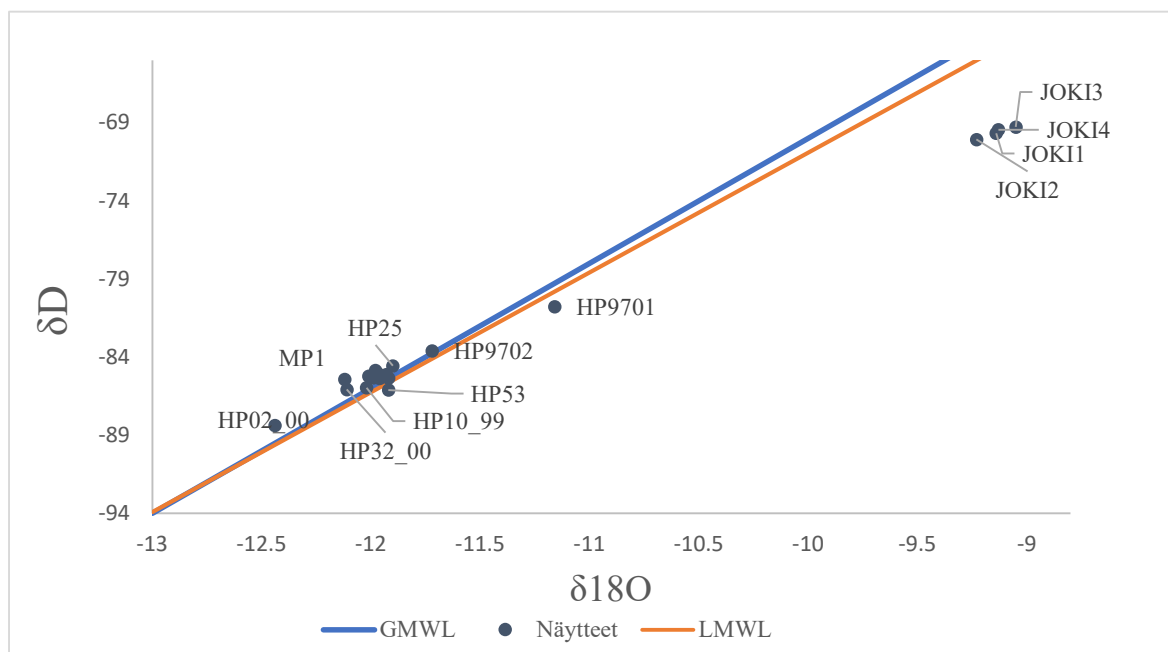
Hyrylän virtausmallinnuksessa oletettiin murroslaaksossa olevan suurempi vedenjohtavuus kuin muualla kallioperässä ja virtausmallin laskemassa pohjaveden pinnassa on nähtävissä hyvin pientä kohoamista murroslaakson kohdalla. Kuvan 33 punaisen katkoviivan malli sopisi siis hyvin tähän tapaukseen. Virtausmallin mukaan

murroslaaksoon ei virtaa vettä lainkaan luoteesta. Pohjaveden pinnan taipuminen ruhjeen rajalla hydraulisen johtavuuden muutoksen takia voi kääntää virtaussuunnan päinvastaiseksi, kuin oletettu. Koska pohjaveden virtaus Hyrylässä aikaisempien tutkimusten ja virtausmallin laskeman pohjaveden pinnan samanarvokäyrien perusteella olisi myös lännestä ja luoteesta kohti murroslaaksoa, saattaa murroslaakson hydraulinen johtavuus vaikuttaa pohjaveden pintaan kääntäen pohjaveden virtauksen takaisin kohti luodetta, jolloin pohjavesi ei pääsisi virtaamaan lännestä kohti murroslaaksoa.

### **6.3. Pintaveden ja pohjaveden vuorovaikutus Hyrylän pohjavesialueella**

Pohjaveden purkautumisesta pintaveteen saatiin paljon havaintoja kenttämittauksissa kesällä 2020. Termiset menetelmät ja suotovirtaamamittaukset osoittivat monta pohjaveden purkautumispaikkaa Tuusulanjoessa Koskenmäen vedenottamon läheisyydessä. Myös pohjaveden virtausmallin mukaan murroslaaksoon virrannut vesi purkautuisi kolmessa kohtaa Tuusulanjokeen. Virtausmalli osoitti suurimmaksi pohjaveden purkautumiskohdaksi saman jokimutkan, jossa tämän tutkimuksen pohjaveden purkautumistutkimukset suoritettiin. Suotovirtaamamittarilla suurin suotauman virtaama mitattiin myös paikassa, jossa sedimenttilämpötilamittaukset osoittivat laajimman purkautumisalueen. Tuusulanjoen pohjasedimentti oli havaintojen perusteella Koskenmäen vedenottamolta alajuoksulla sijaitsevalle sillalle asti hyvin karkeaa ainesta poiketen GTK:n maaperätiedoista (Kuva 3), jossa pintamaalajina joessakin vallitsisi savi.

Kuvassa 34 kaikkien vesinäytteiden stabiilien isotooppien deltajakauma on havainnollistettu pisteinä suhteessa GMWL- ja LMWL- suoriin. Kuvaajassa vähiten haihtuneet vedet sijoituttuvan vasempaan reunaan ja vesien haihtuneisuuden aste kasvaa oikealle siirryttäessä. Pintavesi ja pohjavesinäytteet ovat selvästi ryhmittyneet kuvaajan eri reunoille. Jokinäytteet sijoittuvat oletetusti kuvaajan oikeaan reunaan ja suurin osa pohjavesinäytteistä sijoittuvat vasemmalle yhdeksi ryppääksi ja kuvaavat Hyrylän pohjavesialueen tyypillistä pohjaveden isotooppikoostumusta. Pohjavesinäytteistä yksi, HP9071 havaintoputkesta otettu näyte, erottuu merkittävästi joukosta sijoittuen kuvaajassa enemmän oikealle. HP9701 d- ylijäämä arvosta, joka on 8.52, voidaan päätellä näytteeseen olevan sekoittuneena pintavettä. Havaintoputki HP9701 eroaa myös muilta kemiallisilta ominaisuuksiltaan huomattavasti muista pohjavesinäytteistä.



Kuva 34. Näytteiden stabiilit isotoopit verrattuna GMWL ja LMWL suoriin.

Havaintoputki HP9701 on kaikista alueen havaintoputkista lähimpänä Tuusulanjärveä ja isotooppikoostumuksen perusteella siihen on mahdollisesti sekoittunut vähäisissä määrin pintavettä. Myös HP9702 havaintoputken näyte on kuvaajassa hieman oikealla ja vastaa muista näytteistä eniten HP9701 otettua näytettä. Näitä havaintoputkia lähellä sijaitsevat myös putket HP9703 ja HP1, joiden vesinäytteet ovat kuitenkin hyvin vähän haihtuneita ja selvästi vähän haihtuneita pohjavesiä. HP02\_00 sijoittuu kuvaajassa selvästi vasemmalle ja eroaa isotooppikoostumukseltaan alueen tyypillisestä pohjavedestä.

Muissa pohjavesinäytteissä ei isotooppikoostumuksen perusteella ollut sekoittuneena pintavettä, joten pintaveden suotautumista Tuusulanjoesta ei ole havaittavissa tällä näytteenottoajankohdalla. Aikaisemmissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu pintaveden myös imeytyvän pohjavesiakviferiin Hyrylän pohjavesialueella (Brander 2013, Kivimäki et al. 2013, Rautio 2015, Pöyry Finland Oy 2015). Tämän tutkimuksen näytteenottokierros suoritettiin hyvin kuivan kesäkuun jälkeen kesällä 2020, jolloin Tuusulanjoen pinta oli matalalla ja virtaus vähäinen. Vaikka näytteenottokierroksen aikana satanut vesi nosti Tuusulanjoen pintaa ja virtaamaa, ei mahdollinen pintavesiyhteys ehtinyt näkyä pohjavesinäytteissä tällä tutkimusajankohdalla.

Braderin (2013) pro gradu tutkielmassa pintaveden huomattiin imeytyvän pohjaveteen Koskenmäen vedenottamon eteläpuolella ennen Tuusulanjoen haarautumista. Tämän tutkimuksen perusteella suurimmat pohjaveden purkautumisalueet sijaitsevat haarautumisen jälkeen Tuusulanjoen luoteismutkassa, jossa myös suotovirtaamamittaukset suoritettiin. Pintavettä siis imeytyy pohjaveteen Koskenmäen vedenottamon eteläpuolella ennen joen haarautumista, mutta voimakas pohjaveden purkautuminen tapahtuu heti haarautumisen jälkeen joen mutkassa, jossa myös pohjasedimentti on hyvin karkeaa. Pohjaveden virtausmallin perusteella pohjaveden kulkeutuminen, Braderin (2013) tutkimuksessa havaitussa pintaveden imeytymiskohdassa, on kuitenkin pois päin Koskenmäen vedenottamolta. Tämä tarkoittaa, että Braderin (2013) havaitsemalla pintaveden imeytymispaikalla mahdollisesti Tuusulanjoesta pohjaveteen imeytynyt pintavesi ei virtaisi Koskenmäen vedenottamon kaivon suuntaan. Pöyryn raportissa (Pöyry Finland Oy 2015) on kuitenkin todettu Koskenmäen kaivossa olevan sekoittuneena myös pintavettä ja Koskenmäeltä pohjoiseen mentäessä havaintoputkessa HP9701 on tämän tutkimuksen tulosten perusteella havaittu mahdollinen pintavesiyhteys. Mahdollinen pintavesi Koskenmäen kaivossa voisi olla myös peräisin virtausmallinnuksen partikkelien kulkeutumispolkujen perusteella aivan Tuusulanjoen yläjuoksulta harjun karkean ydinosan kohdalta. Pintavesi Koskenmäen vedenottamolle voi olla myös peräisin suoraan Tuusulanjärvestä kalliokynnyksestä, joka havaittiin 3D-mallin poikkileikkauksissa.

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Pintavesi-pohjavesi vuorovaikutus Hyrylässä näkyi tutkimuksen aikana enimmäkseen pohjaveden purkautumisena Tuusulanjokeen. Tutkitulla jokiosuudella pohjaveden purkauskohtia oli monia, mutta jyrkässä jokimutkassa Koskenmäen vedenottamon lounaispuolella pohjaveden purkautuminen oli laaja-alaisinta. Suotauman virtaama vaihteli lyhyilläkin etäisyyksillä huomattavasti. Tuusulanjoen mutkaan, jossa purkautuminen oli voimakkainta, vesi kulkeutuu pohjoisesta pitkin murroslaaksoa ja edustaa laadultaan erilaista vettä kuin joen idempiin osiin purkautuva pohjavesi. Pohjavesinäytteenoton perusteella vain yhdessä alueen havaintoputkessa pystyttiin toteamaan pintaveden sekoittuneen pohjaveteen. Muut pohjavesinäytteet olivat selvästi haihtumattomia pohjavesiä, joten pintaveden imeytymistä pohjaveteen ja sen kulkeutumispolkua ei voitu todeta.

Hyrylän pohjavesialueella murroslaaksossa, Koskenmäen vedenottamon ympäristössä, pohjaveden pinta on hyvin tasainen laajalla alueella, mikä tekee pohjaveden virtaussuuntien hahmottamisesta hankalaa. Koska pohjaveden pinta on niin tasainen, pohjaveden virtaussuunta on kohti sen purkautumisalueita Tuusulanjoessa. Murroslaaksoon pohjavesi kulkeutuu suurelta osin lännestä ja kaakosta, mutta murroslaakson pohjoisosiin virtaa vettä myös pohjavesialueen luoteispäästä. Lännestä ja luoteesta vesi virtaa kohti pohjavesialueen matalinta kohtaa, joka sijaitsee murroslaaksossa pohjavesialueen eteläpuolella.

Koskenmäen vedenottamolle pohjavesi kulkeutuu soramuodostumaa mukaillen kapealta alueelta kaakosta. Entisten polttoaineen jakeluasemien alueelta, Koskenmäen vedenottamolta noin yksi kilometri etelään, jossa maaperä ja kalliopohjavesi ovat pilaantuneet öljyhiilivedyillä, virtaussuunta on myös kohti murroslaaksoa, mutta vesi ei virtaa Koskenmäelle asti, vaan purkautuu vedenottamon eteläpuolella Tuusulanjokeen. Pohjaveden virtausmallin mukaan Koskenmäen vedenottamolla mallinnustekninen pumppausmäärän maksimi on päivässä 2950 m<sup>3</sup> murroslaakson hyvän vedenjohtavuuden vuoksi, eivätkä pumppausmäärän muutokset vaikuta kaivon sieppausalueeseen.

Pohjavesinäytteiden laadussa oli hyvin vähän eroavaisuuksia, mutta tutkimusalueen reunoilla sijaitsevilla havaintoputkissa HP53 ja HP02/00 vesi oli huomattavasti erilaista kuin Koskenmäen ympäristön havaintoputkissa. Myös havaintoputken HP32/00

havainnot käyttäytyivät virtausmallinnuksen aikana poikkeavasti, joten sen pääteltiin olevan erillään Hyrylän pohjavesiakviferin pääaltaasta. Pohjaveden laatututkimuksilla voitiin vahvistaa virtausmallinnuksen tuloksia ja tulla siihen päätelmään, että vesi ei virtaa Koskenmäen vedenottamolle havaintoputkien HP53, HP02/00 ja HP32/00 suunnalta. Pohjavesi murroslaakson kaikissa näytteenottopaikoissa oli hyvin tasalaatuista, lukuun ottamatta havaintoputkea HP9701, jossa näiden tulosten perusteella luultavasti on sekoittuneena pintavettä Tuusulanjärvestä.

3D-hydrostratigrafinen rakennemalli sekä sen perusteella tehty pohjaveden virtausmalli Hyrylän pohjavesialueesta auttoivat hahmottamaan pohjavesialueen rakennetta ja pohjaveden käyttäytymistä aivan uudella tavalla. 3D-mallin avulla saatiin kattava käsitys kallionpinnan muodosta ja etenkin murroslaakson sijoittumisesta pohjavesialueeseen nähden. Maaperäkerrokset rakennemallin reunoilla ovat verrattain yksinkertaisia ja hieman yleistettyjä, sillä kairaustietoa oli saatavilla koko malliin nähden vain hyvin pieneltä alueelta. 3D-rakennemallista ja pohjaveden virtausmallista oli suuri hyöty tässä tutkielmassa ja niitä voidaan hyödyntää tulevaisuudessa myös Hyrylän pohjavesialueen jatkotutkimuksissa ja riskien arvioinnissa tai mahdollisen maaperän pilaantumisen sattuessa. Maatutkaluotaus ei tuonut juurikaan lisäarvoa tutkimukseen johtuen luotaimen sähköpulsseja häiritsevista ja vaimentavista tekijöistä, kuten liikenteestä, taajama-alueen päällystevaltaisuudesta sekä maaperän hienoaineskerroksista.

Lisätutkimuksen tarvetta on pintaveden imeytymiskausien, -määrän ja -paikkojen suhteen. Tämän tutkimuksen perusteella ehdotetaan pohjavesinäytteenottoa ja niistä hapen ja vedyn stabiilien isotooppien määrittystä silloin kun Tuusulanjoen pinta on korkeammalla kuin pohjaveden pinta, esimerkiksi hyvin sateisen kauden jälkeen, kun mahdollisuudet pintaveden imeytymiselle pohjavesivarastoon ovat suuremmat. Myös pohjaveden purkautumista Tuusulanjoen alajuoksulla, pohjaveden virtausmallin ennustamiin paikkoihin, olisi syytä tutkia fyysisin mittauksin. Pohjaveden purkautuminen joen alajuoksulle vahvistaisi tässä tutkielmassa tehdyn pohjaveden virtausmallin ennustaman pohjaveden virtauksen murroslaakson eteläosissa.

## 8. KIITOKSET

Haluan kiittää ohjaajiani Kirsti Korkka-Niemeä, Anna-Liisa Kivimäkeä ja Kari Korhosta mielenkiintoisesta graduaiheesta ja suuresta avusta gradun kirjoituksen kanssa. Suuri kiitos Helsingin Rotary Klubille motivoivasta Gradu valmiiksi -stipendistä. Kiitokset myös Joonalle Clergeaudille, Seijalle Kultille ja Mia Kotilaiselle avusta maastotöissä ja Helsingin yliopiston laboratoriohenkilökunnalle avusta vesianalyysien kanssa. Suuri kiitos Susanne Åbergille ja Annika Åbergille opetuksesta niin maastutkaluotausaineiston käsittelyssä kuin 3D-mallinnuksessa ja pohjaveden virtausmallinnuksessa. Kiitos koko Keski-Uudenmaan Vesi Kuntayhtymän porukalle avusta ja tsempeistä gradukesän aikana. Kiitokset myös ystäville ja perheelle tuesta ja tsempeistä tämän poikkeuksellisen vuoden aikana.



## 9. VIITELUETTELO

- Backman, B., Lahermo, P., Väisänen, U., Paukola, T., Juntunen, R., Karhu, J., Pullinen, A., Rainio, H. ja Tanskanen, H. 1999. Geologian ja ihmisen toiminnan vaikutus pohjaveteen. Geologian tutkimuskeskus, Espoo, 261 s.
- Bense, V., Gleeson, B., Loveless, S., Bour, O. ja Scibek, J. 2013. Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews* 117, 171-192
- Brander, M. 2013. Virtaamamittaukset tutkimusmenetelmänä pohja- ja pintaveden välisen vuorovaikutuksen arvioinnissa Vantaanjoen valuma-alueen jokiuomissa. Pro gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto, Geotieteiden ja maantieteenlaitos, geologian osasto, 95 s.
- Breilin, O., Paalijärvi, M. ja Valjus, T. 2005. Pohjavesialueen geologisen rakenteen selvitys, Tuusulanharjulla Mätäkiivennummen – Vaununkankaan välisellä alueella. Geologian tutkimuskeskus, arkistoraportti 49/2016, 17 s., 65 liites.
- Bristow, C. ja Jol, H. 2003. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. Geological Society London Special Publications, London, 8 s.
- Clark, I. ja Fritz, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, Florida, 328 s.
- Conant, B., Tobinson, C., Hinton, M. ja Russell, H. 2019. A framework for conceptualizing groundwater-surface water interactions and identifying potential impacts on water quality, water quantity and ecosystems. *Journal of Hydrology*, 574, 609-627.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations on meteoric waters. *American Association for the Advancement of Science*, 133, 1702-1703.
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16, 436 – 468.
- Eaton, A., Clesceri, L., Greenberg, A. ja Franson, M. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater: 19th edition supplement. American Public Health Association, Washington, DC, 43 s.
- Geologian tutkimuskeskus. 2016a. Kallioperäkartta.
- Geologian tutkimuskeskus. 2016b. Maaperäkartta.
- Golder Associates Oy, 2019. TB Hyrylä, Vesinäytetulokset kevät 2019. 1 s, 7 liites.
- Harbaugh, A. 2005. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular groundwater model—the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, Virginia, 253 s.
- Hazen, A. 1911. Discussion of Dams on sand foundations by A. C. Koenig. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 73, 199 – 203
- Ilmatieteen laitos. Havaintojen lataus. Säähavainnot, sademäärä. Sivuilla vierailtu 13.1.2021. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>

- Jol, H. 2009. Ground Penetrating Radar Theory and Applications. Elsevier, Amsterdam, 526 s.
- Karhu, J. 2001. Hapen ja vedyn isotooppivaihtelut meteorisissa vesissä: Suomen pintavedet & matalat pohjavedet. Kirjoituksia pohjavedestä, 3. Ympäristögeologian päivät. Turun yliopisto, Geologian osasto, 35–42.
- Keskitalo, K. 2018. Hyrylän pohjavesialueen antoisuusselvitys - selvitys vedenoton ja kaavoituksen yhteensovittamisesta, Pöyry Finland Oy, 21 s.
- Kivimäki, A-L. ja Luodeslampi, P. 2019. Tuusulan Hyrylän ja Rusutjärven pohjavesialueiden suojelusuunnitelma, Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys ry, raportti 23/2019, 96 s.
- Kivimäki, A-L., Rautio, A., Korkka-Niemi K., Brander, M., Nygård, M., Vahtera, H., Karhu, J., Salonen, V., Kiirinki, M. ja Lahti K. 2013. Vantaanjoen ja sen sivujokien hydrauliset yhteydet pohjavesimuodostumiin ja vaikutukset veden laatuun. Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys ry, Julkaisu 69/2013, 136 s.
- Kortelainen, N. 2007. Isotopic fingerprints in surficial waters: Stable isotope methods applied in hydrogeological studies. Geological Survey of Finland, Espoo, 41 s.
- Leapfrog Geo 5.0 Help 2019. Seequent. Sivulla vierailtu 3.2.2021.  
<https://help.leapfrog3d.com/Geo/5.0/en-GB/Content/intro.htm>
- Leppäranta, M., Virta, J. ja Huttula, T. 2017. Hydrologian perusteet. Helsingin yliopisto, fysiikan laitos. Unigrafia, 207 s.
- Lindgren V. ja Kivimäki A-L. 2020. Tuusulan pohjavesiyhteistarkkailun vuosiraportti 2019. Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys ry, raportti 4/2020, 58 s.
- Maanmittauslaitos. 2016d. Korkeusmalli 2 m, lehdet L4143C, L4143E, L4143F ja L4143L.
- MALÅ Geoscience AB. 2011. Operating Manual v. 2.0, ProEx - Professional Explorer Control Unit. MALÅ, 61s.
- Murdoch, L. ja Kelly, S. 2003. Factors affecting the performance of conventional seepage meters. Water Resources Research 39(6), 1163, SWC 2 (1-10).
- Mälkki, E. 1999. Pohjavesi ja pohjaveden ympäristö. Esko Mälkki ja kirjayhtymä Oy, Tampere, 304 s.
- Neal, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth-Science Reviews 66, 261–330.
- OIVA - Ympäristö- ja paikkatietopalvelu asiantuntijoille. 2012. Ympäristötiedon hallintajärjestelmä Hertta (POVET). Suomen ympäristöhallinto.
- Rautio, A. 2015. Groundwater–surface water interactions in snow-type catchments: integrated resources. Helsingin yliopisto, matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta, geotieteiden ja maantieteen laitos, 50 s. (väitöskirja)

- Reynolds, J. 2011. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons, WestSussex, 712 s.
- Rosenberry, D. ja LaBaugh, J. 2008. Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 4-D2, 128 s.
- Seppälä, M. ja Tuominen S. 2005. Pohjaveden virtauksen mallintaminen. Ympäristöopas 121. Suomen ympäristökeskus. Vammala. 62 s.
- Sophocleous, M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, Hydrogeology Journal 10, 52-67.
- Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista 1352/2015
- Suomen ympäristökeskus. 2016. Pohjavesialueet ja muodostumisalueet. Ladattavat paikkatietoaineistot.
- Suomen ympäristökeskus. 2016. Järvet ja joet. Ladattavat paikkatietoaineistot.
- Torgersen, C., Faux, R., McIntosh, B., Poage, N. ja Norton, D. 2001. Airborne thermal remote sensing for water temperature. Remote Sensing of Environment, 76(3), 386–398 s.
- Virkanen, J., Reijola, H. ja Vaahtojärvi, T. 2017. Geotieteiden ja maantieteen laitoksen ympäristölaboratorion toimintakäsikirja 25.10.2017, Helsingin yliopisto. 193 s.
- Winter, T., Harvey, J, Franke, O. ja Alley, W. 1998. Ground Water and Surface Water A Single Resource. United States Geological Survey Circular, 1139, 79 s.
- Woessner, W. 2020. Groundwater-Surface water Exchange. Groundwater Project, Ontario, 158 s.
- Åberg, S., Åberg, A. ja Korkka-Niemi, K. 2021. Three-dimensional hydrostratigraphy and groundwater flow models in complex Quaternary deposits and weathered/fractured bedrock: evaluating increasing model complexity. Springer, Hydrogeology Journal (2021), Helsinki, 32 s.

## 10. LIITTEET

Taulukko 11. Vesibudjetti (Flow budget) vuoden ajalta kalibroidussa pohjaveden virtausmallissa

Component	Cumulative volume (in)		Cumulative volume (out)	
	Value (m <sup>3</sup> )	Percentage	Value (m <sup>3</sup> )	Percentage
Storage	0	0,0 %	0	0,0 %
Constant head	629615,75	2,1 %	789219,9375	2,7 %
Wells	0	0,0 %	365000	1,2 %
Drain	0	0,0 %	11522155	38,9 %
Head-dependent boundaries	28487340	96,1 %	16954572	57,2 %
Recharge	513911,625	1,7 %	0	0,0 %
Total	29630868	100,0 %	29630948	100,0 %
In - out	-80			

Taulukko 12. Pohjaveden pinnan havainnot (Observed) verrattuna mallin laskemiin pintoihin (Simulated) sekä niiden erotuksesta (Residual) lasketut BIAS, MEAN ja RMSE.

Observation Name	Residual	Observed Value	Simulated Value
GT4_05	-0,45	36,57	37,02
HP01_00	-0,49	37,30	37,79
HP02_00	0,01	48,47	48,46
HP10_99	0,22	38,22	38,00
HP25	-0,50	36,72	37,22
HP27_00	-0,31	37,34	37,65
HP53	0,52	52,71	52,19
HP9701	-0,85	36,47	37,32
HP9702	-0,54	36,74	37,28
HP9703	-0,97	36,36	37,33
HP9704	-1,05	36,30	37,35
HP9705	-0,34	37,08	37,42
HP9707	-0,78	36,44	37,22

BIAS	-0,42
MEAN	0,54
RMSE	0,61